

RESEARCH REPORT
OF
LABORATORY OF NUCLEAR SCIENCE
TOHOKU UNIVERSITY

核 理 研 研 究 報 告

付 核理研30年の歩み
出版論文リスト(1968~1997)

第30巻 第1号

1997年9月

東北大学理学部

原子核理学研究施設

刊 行 規 定

1. 「核理研研究報告」は核理研共同利用による実験報告及びそれに直接関連した研究報告等を掲載します。
2. 本誌掲載の論文に対しては原則として審査を行っておりません。
但し、特別の事情がある場合には投稿論文の掲載を拒否し、あるいは書き直しを求める事があります。
3. 本誌の論文を欧文の論文中に引用される際は Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University 又は Private Communication として引用する事とし、著者の承諾を得た上で引用して下さい。
4. 本誌は毎年6月と12月に発行します。

投 稿 規 定

1. 邦文の原稿はA4判400字詰原稿用紙を使用して下さい。用語は可能な限り文部省編さん「学術用語集」によって下さい。
2. 引用文献、記号、単位、数式、文字指定等は Journal of the Physical Society of Japan の「投稿の手引」に従って下さい。
特に次の点について御注意下さい。
原稿には添字、ギリシャ文字、イタリック、ゴシック、立体、まぎらわしい大文字及び小文字を赤鉛筆で指定して下さい。但し、文中の文字記号及び数式は原則としてイタリックで組みますので、単位及び元素記号、数式中特に立体とすべき文字記号は必ず立体の指定をして下さい。英文の原稿の場合は、イタリックの方を指定して下さい。
3. 図及び表には1枚毎に「第1図」、「第2表」のように番号を付けて下さい。図は全て墨入れし、縮尺又は刷り上がり寸法を記入して下さい。但し、1/3以下の縮尺はご遠慮下さい。
4. 図及び表の挿入個所を原稿に指定して下さい。
5. 図及び表の説明をそれぞれ別紙にまとめて原稿の末尾につけて下さい。
6. 原稿締切日は4月30日と10月31日です。原稿は下記あて提出して下さい。

仙台市太白区三神峯1-2-1 郵便番号 982

東北大学理学部原子核理学研究施設

「核理研研究報告」編集委員長

核理研研究報告 第30巻 第1号 目次

I 原子核物理

- I - 1 Neutron Decay of the Giant Resonance Region in ^{13}C via the $(e, e' n)$ Reaction 1

(核理研, 理学研究科物理^{*}, 工学研究科量子エネルギー工学^{**})

鈴木 伸介, 齋藤悌二郎, 高久 圭二, 高桑 智恵,
中川 武美^{*}, 藤平 力^{*}, 阿部 健^{**}

- I - 2 $(e, e' n)$ 反応による ^{16}O の巨大共鳴の研究 11

(核理研, 理学研究科物理^{*}, 工学研究科量子エネルギー工学^{**},
山形大理学部^{***})

木野 幸一, 齋藤悌二郎, 須賀 洋介, 遠藤 卓哉,
吉田 耕平, 高橋 一憲, 中川 武美^{*}, 阿部 健^{**},
上野 博昭^{***}

II 放射化学

- II - 1 Replacement Reaction of Ruthenium Recoil Atoms in Solid Ruthenocene Derivative Complexes 23

(理学研究科化学)

関根 勉, 山口 巖, 工藤 博司

- II - 2 Recoil Properties of Radionuclides Formed in the Photonuclear Reactions on ^{nat}Cu at Intermediate Energies 35

(金沢大自然科学研究科, 金沢大理学部^{*}, 都立大理学部^{**},
京大原子炉^{***}, 名大理学部^{****}, 追手門大^{*****})

羽場 宏光, 松村 宏, 宮本ユタカ, 坂本 浩^{*},
大浦 泰嗣^{**}, 柴田 誠一^{***}, 古川 路明^{****},
藤原 一郎^{*****}

II - 3	アクチニド核種の高感度測定法に関する実験研究 (I)	
	弗化サマリウム共沈法の検討.....	46
	(金研材料試験炉利用施設)	
	三頭 聰明, 原 光雄, 鈴木 吉光, 渡部 信	
II - 4	Diffusion of Magnesium in Al-Mg-Si Alloys	52
	(工学研究科材料物性)	
	藤川辰一郎	
II - 5	Diffusion of Scandium in Aluminum.....	62
	(工学研究科材料物性)	
	藤川辰一郎	
II - 6	Properties of Radioactive Fullerene Families.....	69
	(核理研, 高工研田無分室 [*] , 都立大理学部 ^{**} , 金研 ^{***})	
	大槻 勤, 榎本 和義 [*] , 末木 啓介 ^{**} , 菊地 耕一 ^{**} ,	
	大野かおる ^{***} , 丸山 豊 ^{***} , 川添 良幸 ^{***}	
III	加速器・測定装置	
III - 1	ストレッチャー・ブースタリングの基本設計.....	81
	(核理研, 高工研 [*])	
	玉江 忠明, 小山田正幸, 加藤 正博 [*] , 菅原 真澄,	
	山川 達也	
III - 2	Report on Design of Magnets for STB	95
	(核理研, 高工研 [*] , 理学研究科物理 ^{**})	
	封 碧波, 加藤 正博 [*] , 中里 俊晴, 小山田正幸,	
	佐藤 繁 ^{**} , 菅原 真澄, 玉江 忠明, 山川 達也	
III - 3	ストレッチャー・ブースタリングの精密アラインメント.....	108
	(核理研)	
	井上 隆, 中里 俊晴, 小山田正幸, 封 碧波,	
	浦澤 茂一, 玉江 忠明, 高橋 重伸, 内田 智久,	
	渡辺 勝美	

III-4	Design Study of Infrared Free Electron Laser with Tohoku Linac	123
	(核理研, 理学研究科物理*)	
	封 碧波, 小山田正幸, 佐藤 繁*, 菅原 真澄	
III-5	コヒーレント放射によるバンチ形状の計測 (I)	
	—マーチン・パレット型干渉分光計の製作—.....	140
	(核理研, 科研*)	
	渡辺 勝美, 小山田正幸, 中里 俊晴, 浦澤 茂一,	
	内田 智久, 柴田 行男*, 池沢 幹彦*, 伊師 君弘*	
III-6	偏極標的 Rb 原子の偏極度, 気体厚さの測定	150
	(核理研, 理学研究科物理*)	
	横川 民雄, 玉江 忠明, 阿部 和廣, 今野 收,	
	菅原 真澄, 田中 英二, 坪田 博明*, 中川 格,	
	西川 至, 宮瀬 晴久*, 山口 伸夫, 山崎 寛仁	
III-7	中性子検出器用吸収体 ²⁰⁹ Bi による中性子の減衰率の測定	161
	(核理研, 山形大理学部*, 理学研究科物理**, サイクロトロン RI センター***)	
	吉田 耕平, 木野 幸一, 遠藤 卓哉, 齋藤悌二郎,	
	上野 博昭*, 中川 武美**, 藤井 優**,	
	相澤 剛**, 松永 光暢**, 寺川 貴樹***	
IV	加速器稼働状況	
IV-1	平成8年度マシン報告.....	169
	(マシングループ)	
	栗原 亮, 浦澤 茂一, 小山田正幸, 柴崎 義信,	
	高橋 重伸, 中里 俊晴	
V	論文リスト.....	173
VI	出版論文リスト (1968~1997)	175

Research Report of Laboratory of Nuclear Science
Volume 30, Number 1
Contents

I Nuclear Physics	
I - 1 Neutron Decay of the Giant Resonance Region in ^{13}C via the $(e, e' n)$ Reaction	1
Shinsuke Suzuki, Teijiro Saito, Keiji Takahisa, Chie Takakuwa, Takemi Nakagawa, Tutomu Tohei and Ken Abe	
I - 2 Study of the Giant Resonance of ^{16}O by the $(e, e' n)$ Reaction	11
Kouichi Kino, Teijiro Saito, Yousuke Suga, Takuya Endo, Kohei Yoshida, Kazunori Takahashi, Takemi Nakagawa, Ken Abe and Hiroaki Ueno	
II Radiochemistry	
II - 1 Replacement Reaction of Ruthenium Recoil Atoms in Solid Ruthenocene Derivative Complexes	23
Tsutomu Sekine, Iwao Yamaguchi and Hiroshi Kudo	
II - 2 Recoil Properties of Radionuclides Formed in the Photonuclear Reactions on ^{nat}Cu at Intermediate Energies	35
Hiromitu Haba, Hiroshi Matsumura, Yutaka Miyamoto, Kou Sakamoto, Yasuji Oura, Seiichi Shibata, Michiaki Furukawa and Ichirou Fujiwara	
II - 3 Experimental Study on the Highly Sensitive Method of Actinides Determination (I) Application of Coprecipitates with Samarium Trifluorides to Alpha-spectrometry	46
Toshiaki Mitsugashira, Mitsuo Hara, Yoshimitsu Suzuki and Makoto Watanabe	
II - 4 Diffusion of Magnesium in Al-Mg-Si Alloys	52
Shin-itiroh Fujikawa	

II – 5	Diffusion of Scandium in Aluminum.....	62
	Shin-itiroh Fujikawa	
II – 6	Properties of Radioactive Fullerene Families.....	69
	Tsutomu Ohtsuki, Kazuyoshi Masumoto, Keisuke Sueki, Koichi Kikuchi, Kaoru Ohno, Yutaka Maruyama, Yoshiyuki Kawazoe	
III Accelerator and Instrumentation		
III – 1	Fundamental Design of the Stretcher-Booster Ring	81
	Tadaaki Tamae, Masayuki Oyamada, Masahiro Kato, Masumi Sugawara and Tatsuya Yamakawa	
III – 2	Report on Design of Magnets for STB	95
	Bibo Feng, Masahiro Kato, Toshiharu Nakazato, Masayuki Oyamada, Shigeru Sato, Masumi Sugawara, Tadaaki Tamae and Tatsuya Yamakawa	
III – 3	Alignment of the Stretcher-Booster Ring Magnet.....	108
	Takashi Inoue, Toshiharu Nakazato, Masayuki Oyamada, Bibo Feng, Shigekazu Urasawa, Tadaaki Tamae, Shigenobu Takahashi, Tomohisa Uchida and Katumi Watanabe	
III – 4	Design Study of Infrared Free Electron Laser with Tohoku Linac	123
	Bibo Feng, Masayuki Oyamada, Shigeru Sato and Masumi Sugawara	
III – 5	Measurement of an Electron Bunch Shape using Coherent Radiation –Construction of a Martin-Puplett Type Interferometer–	140
	Katumi Watanabe, Masayuki Oyamada, Toshiharu Nakazato, Shigekazu Urasawa, Tomohisa Uchida, Yukio Shibata, Mikihiko Ikezawa and Kimihiro Ishi	
III – 6	Measurement of a Polarization and Gas Thickness for Rb Atoms Used for Polarized Targets	150
	Tamio Yokokawa, Tadaaki Tamae, Kazuhiro Abe, Osamu Konno, Masumi Sugawara, Eiji Tanaka, Hiroaki Tsubota, Itaru Nakagawa, Haruhisa Miyase, Nobuo Yamaguchi and Hirohito Yamazaki	

III - 7	Attenuation of Neutron Flux by a ^{209}B Absorber Used for a Neutron Detector	161
	Kouhei Yoshida, Kouichi Kino, Takuya Endo, Tejiro Saito, Hiroaki Ueno, Takemi Nakagawa, Yu Fujii, Takeshi Aizawa, Mitsunobu Matsunaga and Atsuki Terakawa	
IV	Status Report on the Accelerator	
IV - 1	Status of the Electron Linac.	169
	Akira Kurihara, Shigekazu Urasawa, Masayuki Oyamada, Yoshinobu Shibasaki, Shigenobu Takahashi and Toshiharu Nakazato	
V	List of Publications	173
VI	List of Publications (1968~1997)	175

I. 原 子 核 物 理

Neutron Decay of the Giant Resonance Region in ^{13}C via the $(e,e'n)$ Reaction

S. Suzuki, T. Saito, K. Takahisa, C. Takakuwa
T. Nakagawa[†] T. Tohei[†] and K. Abe[‡]

*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University,
Mikamine, Taihakuku, Sendai 982, JAPAN*

[†]*Department of Physics, Tohoku University,
Aramaki, Aobaku, Sendai 980-77, JAPAN*

[‡]*Department of Nuclear Engineering, Tohoku University,
Aramaki, Aobaku, Sendai 980-77, JAPAN*

The cross sections and angular correlations for neutron emission to various states in the residual nucleus, following the ^{13}C $(e,e'n)$ reaction have been measured over the energy range 8-27 MeV. In the pygmy resonance, neutrons are mainly fed the ground and first excited states in ^{12}C , but in the giant resonance neutrons mostly fed two higher excited states (12.7 MeV $T=0$, 15.1 MeV $T=1$). An isospin splitting and the relative $T_<$ and $T_>$ strengths of the giant resonance of which isospin is directly assigned from the decay states, agree with the predictions. Angular correlation parameters of the giant dipole resonance are very similar in ^{13}C and ^{12}C , which provides some support a weak coupling model in which the giant resonance in ^{13}C will proceed via core excitation of ^{12}C .

§1. Introduction

The ^{13}C nucleus is one of very familiar nuclei for studying the behavior of a valence nucleon. The resonance which a valence nucleon contributes is called a pygmy resonance and is observed around 14 MeV in ^{13}C . The giant dipole resonance (GDR) in ^{13}C is known to split by the isospin. The ^{13}C GDR has two isospin components ($T=1/2, 3/2$) as the isospin of the ground state is $T_0=1/2$. In general a T_0 component is called a

$T_{<}$ GDR and T_{0+1} one is called a $T_{>}$ GDR. In inelastic electron scattering, asplitting of the GDR into two large peaks at 20.5 and 24.5 MeV are observed¹⁾. From the previous studies the lower and higher energy peaks have been assigned to correspond to the $T_{<}$ and $T_{>}$ GDRs, respectively.

The ^{13}C nucleus has one neutron in the $1p_{1/2}$ shell coupled with the ^{12}C core which consists of a sub-closed orbit. It is very low threshold energy 4.95 MeV for neutron emission comparing with 18.7 MeV in ^{12}C . When the ^{13}C nucleus is excited in the giant resonance region, many levels populating from this resonance are open for neutron emission. Through the excitation energy and populated levels we can get information on the decay process of the giant resonance. In this paper we report direct separation of the isospin components of the pygmy and giant resonances in ^{13}C via the $(e, e' n)$ reaction and discuss a structure of the GDR in ^{13}C based on a comparison with the GDR in ^{12}C .

§ 2. Experiment

The 129 MeV electron beam from the pulse beam stretcher ring at Tohoku University²⁾ was used to bombard a ^{13}C enriched target (99.2%) of thickness 155 mg/cm² in the form of a pressed disk of powder³⁾. A beam current was 50-80 nA with an 80% duty factor. The scattered electrons were momentum analyzed by a magnetic spectrometer and detected with a multiwire proportional counter and three layers' plastic scintillators. The emitted neutrons from the target nuclei were detected by five liquid scintillators (NE213). The data were obtained at 54°, 73°, 79°, 98°, 104°, 129°, 154°, 204°, 234°, and 264° against the electron beam direction on the scattering plane by twice measurements at different set up. The neutron energy was decided by a time-of-flight method in a flight pass of 1.0 m. The efficiency for electron detectors was determined by elastic scattering of ^{12}C . The neutron detector efficiencies were determined by measurements of self-spontaneous neutrons from a ^{252}Cf source. Experimental details are described elsewhere⁴⁾.

§3. Results and Analysis

Figure 1 shows a missing energy spectrum for the $^{13}\text{C}(e, e' n)$ reaction. In the spectrum, four distinct peaks centered at approximately 5, 9, 17, and 20 MeV are seen in the spectrum. They correspond to the ground 0^+ , 4.4 MeV 2^+ , 12.7 MeV 1^+ , and 15.1 MeV 1^+ states of the residual nucleus ^{12}C . We call after n_0 , n_1 , n_s , and n_{11} for the above decay neutrons. Clear peaks corresponding to 7.65 MeV 0^+ , 9.64 MeV 3^- , and 10.3 MeV 0^+ states were not observed in the missing energy spectrum. The cross sections were obtained from the yield within ± 1.5 MeV for each missing energy peak.

Figure 2 shows a comparison of the $^{13}\text{C}(e, e' n)$ cross section with that of the (γ, n) reaction. Upper one is photoreaction data. Larger cross section curve shows $(\gamma, n_{\text{tot}})^{5)}$, and dot-dashed and solid curves show $(\gamma, n_0)^{6, 7)}$ and $(\gamma, n_1)^{7)}$ cross sections, respectively.

The pygmy resonance decays through n_0 and n_1 both in the (γ, n) and $(e, e' n)$ reactions, but there is a difference in

the $T <$ giant resonance, namely it decays through n_0 in the (γ, n) reaction, but it decays mostly through n_s in the $(e, e' n)$ reaction. The $T >$ giant resonance decays through n_{11} . In this way we could identify the isospins for the giant resonance from the decay states. The energies of the pygmy resonance, $T <$ and $T >$ giant resonances agree well with those from electron scattering¹⁾.

Typical angular correlations for these resonances are shown in Fig. 3. These angular correlations are analyzed with following method. The obtained parameters are presented in Figs. 4-5. The theoretical cross section can be written as^{8, 9)}

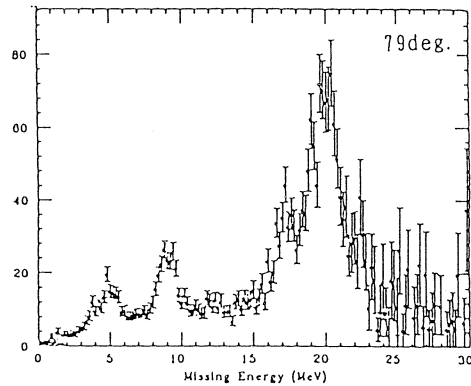


Fig.1. Missing energy spectrum for the $^{13}\text{C}(e, e' n)^{12}\text{C}$ reaction at $\theta = 79^\circ$.

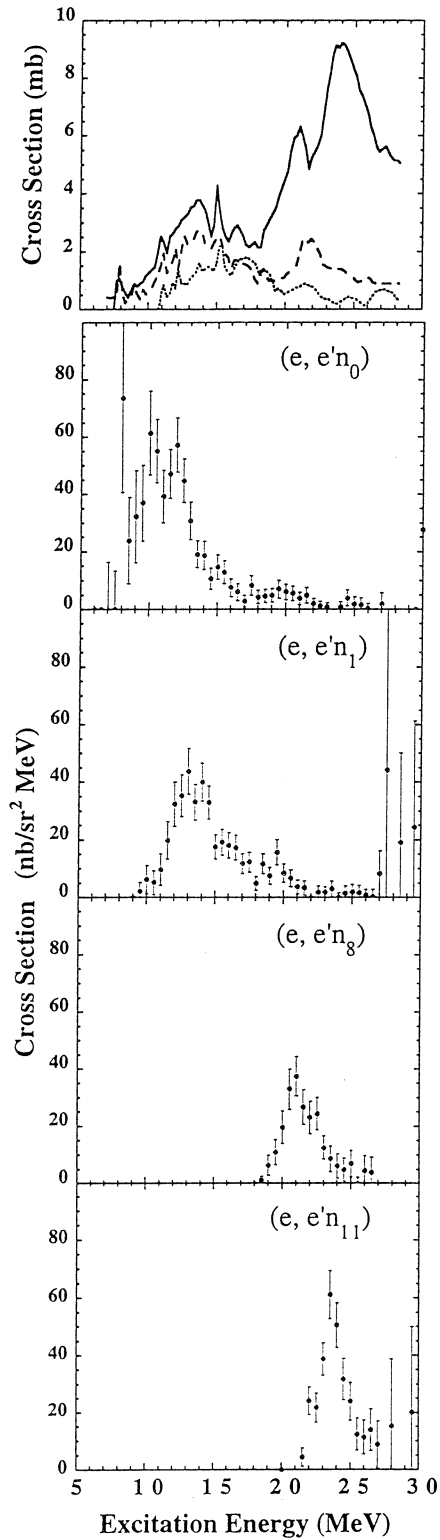


Fig. 2. Comparison between ^{13}C $(e, e' n)$ and ^{13}C (γ, n) cross sections. Upper one is photoreaction data. Solid curve shows $(\gamma, n_{\text{tot}})^{5)}$, and dashed and dot curves show $(\gamma, n_0)^{6, 7)}$ and $(\gamma, n_1)^{7)}$, respectively.

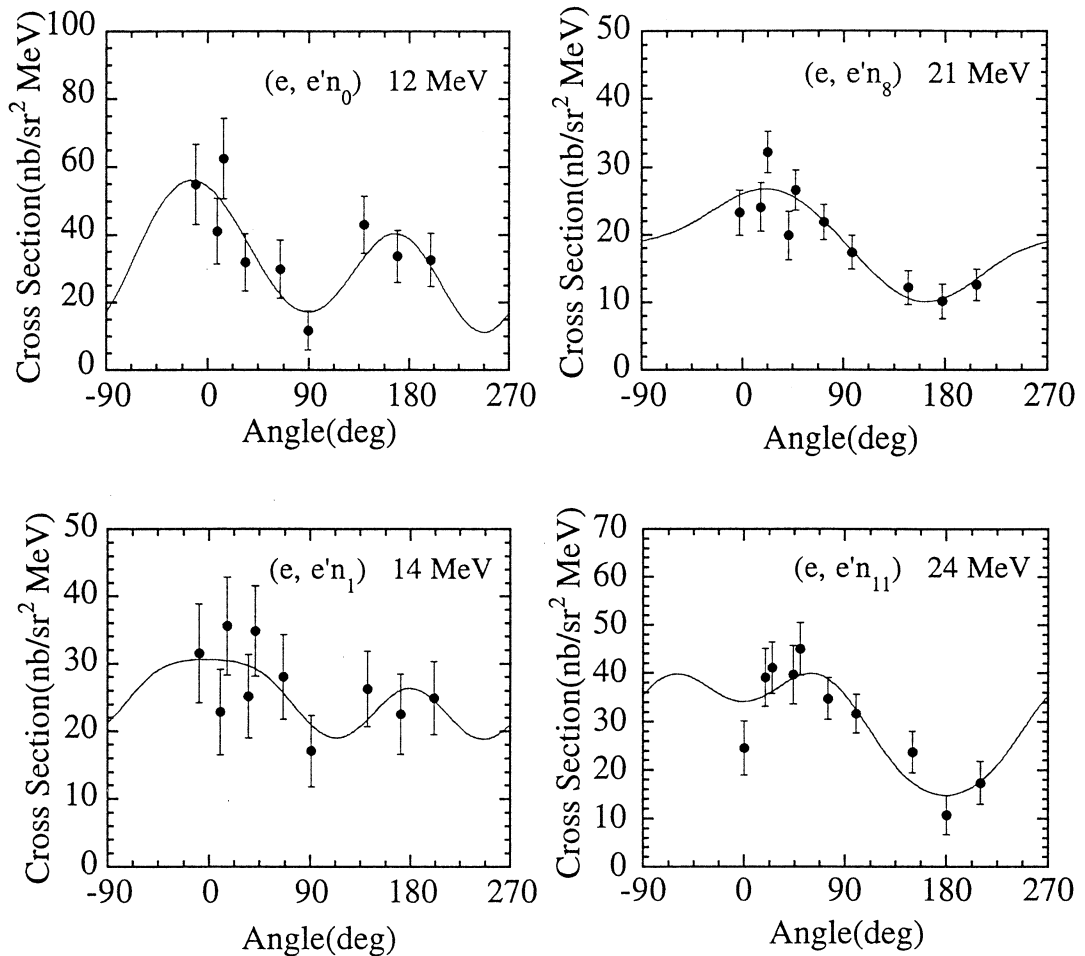


Fig.3. Angular correlations for each neutron group from the pygmy resonances (12 MeV, 14MeV), $T <$ giant resonance (21 MeV), and $T >$ giant resonance (24 MeV). Solid curves are best fits to Legendre polynomials.

$$d^3 \sigma / d\Omega_e \cdot d\omega \cdot d\Omega_n = \sigma_M \{ V_L R_L + V_T R_T + V_{LT} R_{LT} \cos \phi_n + V_{TT} R_{TT} \cos 2 \phi_n \}, \quad (1)$$

where σ_M is the Mott cross section for scattering on a point nucleus and V_i are the leptonic kinematic factors. The response functions R_i contain all the nuclear structure information. Under the present experimental conditions, i. e. forward scattering ($\theta_e = 30^\circ$) and low momentum transfer $q_{eff} = 0.35 \text{ fm}^{-1}$, electron excites the GDR mainly by longitudinal excitation ($C1(q, \omega)$) and excites weakly the electric quadrupole and transverse electric dipole resonances. The term R_L is longitudinal response function

consisting of $|C1(q, \omega)|^2$ and $C1(q, \omega)^* \times C2(q, \omega)$, R_T the transverse response function of $|T1(q, \omega)|^2$. The term R_{LT} is the longitudinal-transverse interference term of $C1(q, \omega)^* \times T1(q, \omega)$, and R_{TT} is the transverse-transverse interference term of $|T1(q, \omega)|^2$. The response functions are approximated by a series of Legendre polynomials and associated Legendre polynomials up to third order;

$$\begin{aligned}
 V_L R_L + V_T R_T &= A_0 [1 + b_1 P_1(x_n) + b_2 P_2(x_n) + b_3 P_3(x_n)], \\
 V_{LT} R_{LT} &= C_2 [c_1 P_1^1(x_n) + P_2^1(x_n) + c_3 P_3^1(x_n)], \\
 V_{TT} R_{TT} &= D_2 P_2^2(x_n), \\
 x_n &= \cos \theta_n.
 \end{aligned} \tag{2}$$

In a χ fitting the following approximations were assumed. From a Goldhaber-Teller model (G-T model), the ratio of the transverse strength to the longitudinal one was estimated from 3% ($E_x = 10$ MeV) to 25% ($E_x = 30$ MeV) in the present experimental condition. The transverse term was less than C1 term. So we neglected c_1 , c_3 , and D_2 terms. Then cross section can be expressed by five terms

$$d^3 \sigma / d\Omega_e \cdot d\omega \cdot d\Omega_n = b_0 [1 + b_1 P_1(x) + b_2 P_2(x) + b_3 P_3(x) - c_2 P_2^2(x)], \tag{3}$$

where b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , c_2 are fitting parameters.

The branching ratio of a pygmy resonance is interested to obtain information of a coupling of a valence nucleon with a core. The experimental ratio of the cross sections for the neutron emissions to the ground and first excited states is found to be ~ 1.6 , which roughly agrees with the $(\gamma, x \gamma')$ result¹⁰⁾ of the ratio ~ 2 , indicating that the dominant configurations are those in which the excited nucleon is coupled to the 0^+ ground state. On the other hand, Kissner *et al.*¹¹⁾ has calculated the nucleon decay of photoresonance in ^{13}C using bound-state shell model and R-matrix theory. In this calculation the pygmy resonance decays mainly to the 2^+ , 4.44 MeV state in ^{12}C , and decays weakly to the 0^+ , 10.3 MeV state. The calculation reproduces well the gross structure of the ^{13}C absorption cross section, but it fails to reproduce the

branching ratio of the decay of the pygmy resonance.

§ 4. Discussion

Previously an isospin splitting of the giant resonance in ^{13}C has been investigated by several methods. A comparison of the total photoneutron cross section⁵⁾ with data on the ground-state photoreaction and with average photoneutron energies⁶⁾ provide an evidence for the isospin splitting of the giant resonance. From a combination of high resolution measurements of the $^{13}\text{C}(\gamma, p)$ cross section with the $^{13}\text{C}(\gamma, n)$ cross section, an estimate of the total cross section is obtained¹²⁾. This cross section is used to estimate the ^{13}C $T_{<}$ strength by subtracting the ^{12}C absorption cross section from it. However, a normalizing factor of 0.78 was applied to the ^{12}C photoabsorption cross section. The isospin splitting is indicated from the isospin of the decay states in the $^{13}\text{C}(\gamma, n\gamma')$ and $(\gamma, p\gamma')$ reactions¹⁰⁾. Although neutron emission contribution to the 16.1 MeV state is not measured, it is estimated by an analogy to the (γ, p) process. The isospin effects in the photodisintegration of the light nuclei are summarized in review work by Eramzhyam *et al.*¹³⁾.

In the present study the isospin components of the giant resonance are directly assigned from the decay states. The $T_{<}$ GDR decays mainly to the 12.7 MeV state and weakly to the ground and first excited states as shown in Fig. 2. The $T_{>}$ GDR decays mostly to the 15.1 MeV, $T = 1$ state. The 16.1 MeV, $T = 1$ state may also be populated, but it could not be observed clearly, which is different from predictions based on the $(\gamma, x\gamma')$ study¹⁰⁾ and calculation¹¹⁾ that the $T_{>}$ GDR in the region of 25 MeV decays almost entirely to the 15.1 and 16.1 MeV states.

The energy of the $T_{<}$ resonance is determined to be 21 MeV from the n_0 , n_1 , n_8 transitions. Assuming the $(e, e' n_{11})$ resonance is a pure $T_{>}$ resonance, the present data shows the isospin splitting. The observed splitting energy is 2.7 MeV which is consistent with the previous experimental results¹⁾. When the ratio of the $T_{<}$ GDR and $T_{>}$ GDR is assumed to be given by the ratio of the $(e, e' n_8)$ and $(e, e' n_{11})$ strengths, the ratio is found to be $1: 1.8 \pm 0.2$. It agrees well with the values of $1: 1.91$ calculated by Goulard and Fallieros¹⁴⁾.

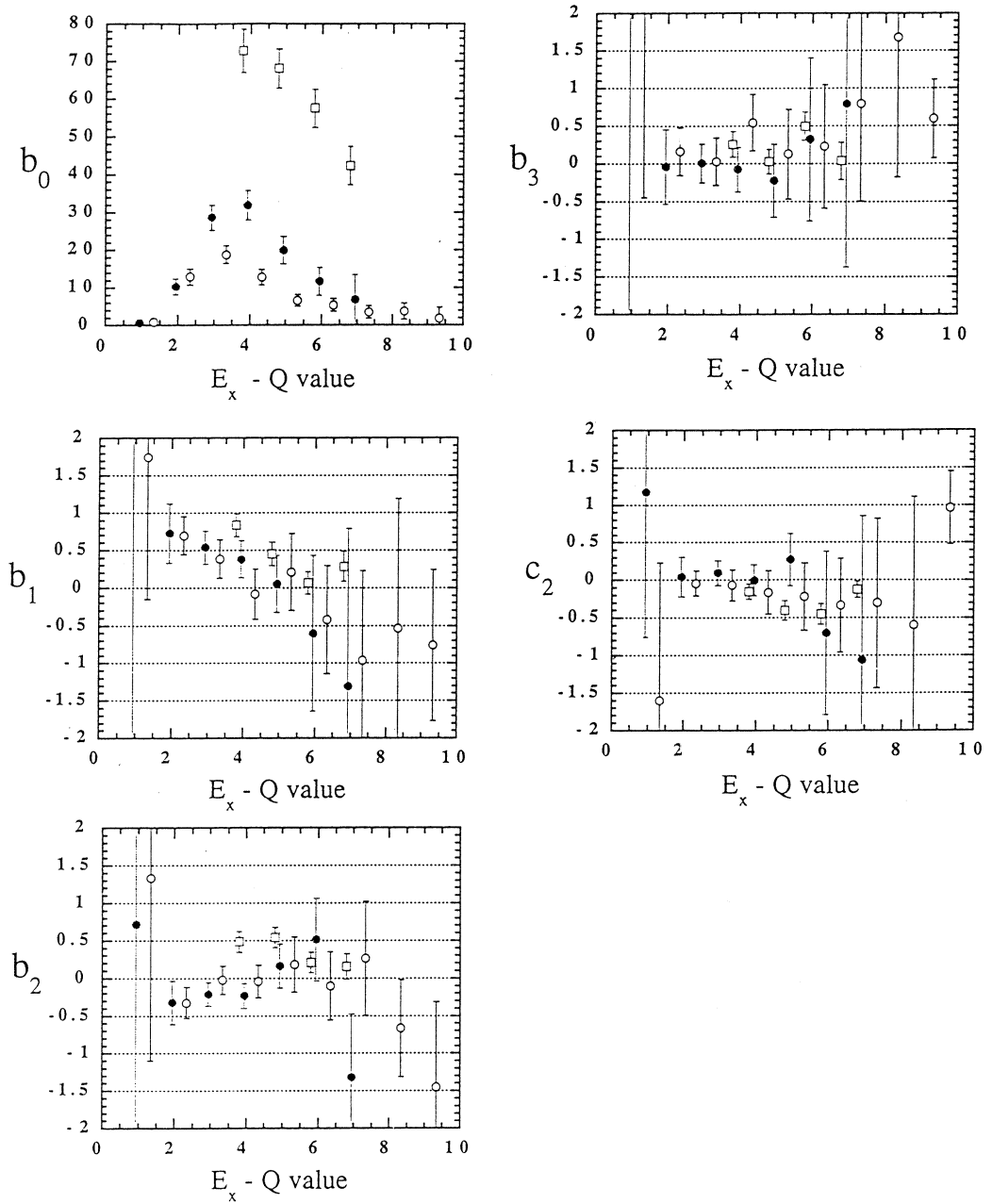


Fig. 4. Comparison of the Legendre parameters for the giant resonance in ^{13}C and ^{12}C . $^{13}\text{C}(e, e' n_4)$: open circles, $^{13}\text{C}(e, e' n_5)$: closed circles, $^{12}\text{C}(e, e' n_0)$: open squares.

As described above, the strong decays to the 12.7 MeV, $T = 0$ and 15.1 MeV, $T = 1$ states were observed in the giant resonance region. The configurations of these states are well known to be $1p_{3/2}^{-1}2$, $1p_{2/1}$. So we can make a model for the giant resonance of ^{13}C as a particle-hole excitation with the $1p_{3/2}$ hole in the ^{12}C core and a valence neutron which does not change, namely a weak coupling model. This $T = 1$ GDR state in ^{12}C core couples to the valence neutron producing $T = 1/2$ and $T = 3/2$ GDR states. If the neutron decay from GDR is only from $p_{3/2}$ state, the configuration becomes $1p_{3/2}^{-1}2$ $1p_{1/2}$ which agrees with that of the 12.7 MeV and 15.1 MeV states. So the angular correlations of the GDR of ^{13}C should be in agreement with that of ^{12}C . Figure 4 shows a comparison of the angular correlations for $^{12}\text{C}(e, e' n_0)$ carried out at a similar kinematics¹⁵⁾, $^{13}\text{C}(e, e' n_s)$ and $^{13}\text{C}(e, e' n_{II})$. In the figure excitation energy is replaced by $E_x - Q$ values. The fitting parameters for these reactions agree well with each other. Also the sum of the $(e, e' n_s)$ and $(e, e' n_{II})$ cross sections tends to be close to the cross section of $^{12}\text{C}(e, e' n_0)$ ¹⁶⁾.

The cross sections for the photoreaction and $(e, e' n)$ reaction in ^{13}C are compared in Fig. 5. The $(\gamma, n_{\text{high}})$ cross section shown by a solid line is obtained by subtracting the (γ, n_0) and (γ, n_1) cross sections from the $(\gamma, n_{\text{total}})$ cross section. In the figure the cross sections b_0 of the $(e, e' n)$ reaction were converted into photon limit under the assumption of the static-limit resonance approximation⁸⁾ using the G-T model. We can find an agreement between the two peaks in the $^{13}\text{C}(\gamma, n_{\text{high}})$ cross section and the peak in the $^{13}\text{C}(e, e' n_s)$ and $^{13}\text{C}(e, e' n_{II})$ cross sections.

In summary, the angular correlations and cross sections to various excited states of the residual nuclei for the $^{13}\text{C}(e, e' n)$ reaction have been measured in the region of about 8-27 MeV. The states populated are only the ground, 4.44 MeV, 12.7 MeV, $T = 0$ states and 15.1 MeV, $T = 1$ state. In the pygmy resonance, a ratio of 1.6 to the ground and first excited states agrees with the previous measurement, but is contrary to the prediction that most decay should be through the first excited state. The main peak of the giant resonance is almost entirely due to the neutron emission to the 12.7 and 15.1 MeV states in ^{13}C . An isospin splitting and the relative $T <$ and $T >$ strengths of the giant resonance of which isospins are directly assigned from the decay state,

agree with the predictions. Angular correlation parameters of the giant dipole resonance are very similar in ^{13}C and ^{12}C , which suggest to support a weak coupling model in which the giant resonance in ^{13}C will proceed via core excitation of ^{12}C .

We would like to thank the linac crew of the Laboratory of Nuclear Science for providing the high quality beam.

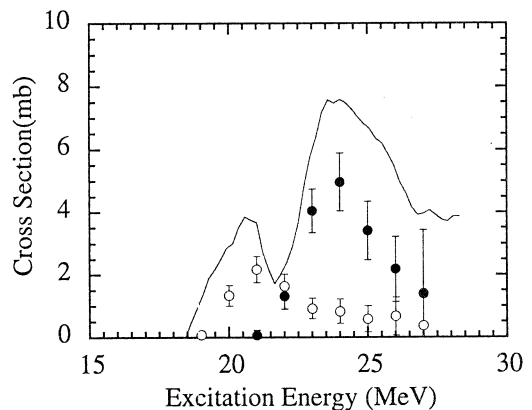


Fig. 5. Comparison of $^{13}\text{C}(\gamma, n_{\text{high}})$ cross section (solid curve) with $^{13}\text{C}(e, e' n_8)$ (open circles) and $^{13}\text{C}(e, e' n_{11})$ (closed circles) cross sections.

References

- 1) J. C. Bergstrom *et al.* : Phys. Rev. C **4** (1971) 1514.
- 2) T. Tamae *et al.* : Nucl. Instrum. Methods **A264** (1988) 173.
- 3) S. Shoda *et al.* : Phys. Lett. **169B** (1986) 17.
- 4) S. Suzuki *et al.* : Nucl. Instrum. Methods **A314** (1992) 547.
- 5) J. W. Jury *et al.* : Phys. Rev. C **19** (1979) 1684.
- 6) J. W. Woodworth *et al.* : Can. J. Phys. **55** (1977) 1704.
- 7) J. W. Woodworth *et al.* : Nucl. Phys. **A327** (1979) 53.
- 8) W. E. Kleppinger and J. D. Walecka : Ann. Phys. (N. Y.) **146** (1983) 349.
- 9) G. Co' and S. Krewald : Nucl. Phys. **A433** (1985) 392.
- 10) B. H. Patrick *et al.* : J. Phys. G: Nucl. Phys. **1** (1975) 874
- 11) H. R. Kissener : Nucl. Phys. **A219** (1974) 601.
- 12) D. Zubanov *et al.* : Phys. Rev. **C27** (1983) 1957.
- 13) R. A. Eramzhyan *et al.* : Phys. Pep. **136** (1986) 229.
- 14) B. Goulard and S. Fallieros : Can. J. Phys. **45** (1967) 3221.
- 15) T. Saito *et al.* : Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1018.

(e, e' n) 反応による ^{16}O の巨大共鳴の研究

核理研, 理学研究科物理*,
 工学研究科量子エネルギー工学**,
 山形大理学部***

木野幸一・齋藤悌二郎・須賀洋介・
 遠藤卓哉・吉田耕平・高橋一憲・
 中川武美*・阿部健**・上野博昭***

§ 1. 序論

^{16}O 核は, その巨大共鳴領域の励起構造が様々なプローブで調べられている。光核反応では, 励起エネルギー $\omega = 20 \sim 30 \text{ MeV}$ にわたり大きな双極子巨大共鳴 (GDR) ピークが観測される。軽核でよく見られるように, そのピークは構造をもっており, $\omega = 22.3, 24.2 \text{ MeV}$ にある主要なピークは, $(d_{5/2}, p_{3/2}^{-1})$, $(d_{3/2}, p_{3/2}^{-1})$ の 1 p-1 h 状態が主配位であると考えられている。また GDR 領域には四重極巨大共鳴 (GQR) の存在が様々な実験で示唆されており, $^{16}\text{O} (\alpha, \alpha' \alpha)^{1)}$, $^{16}\text{O} (e, e' \alpha)^{2)}$ 反応では $\omega = 21 \text{ MeV}$ を中心に位置するアイソスカラー GQR が観測されている。アイソスカラー, アイソベクトルともに観測できる $^{15}\text{N}(\vec{p}, r_0)$ 反応^{3,4)} では, $\omega = 22 \text{ MeV}$ から増加する形状の E2 強度が得られており, アイソベクトル GQR はこの領域に存在するものと考えられる。

ところで, Kleppingerら⁵⁾ による SLRA (Static Limit Resonant Approximation) を用いると本研究のプローブである (e, e' x) 反応の断面積を以下の様に表すことができる。

$$\frac{d^3\sigma}{d\omega d\Omega_e d\Omega_x} = \sigma_{\text{Mott}} \left[V_L W_L + V_T W_T + V_{LT} W_{LT} \cos \phi + V_{TT} W_{TT} \cos 2\phi \right]$$

$$V_L W_L + V_T W_T = \sum_l b_l P_l(\cos \theta_x)$$

$$V_{LT} W_{LT} = \sum_l c_l P_l^1(\cos \theta_x)$$

$$V_{TT} W_{TT} = \sum_l d_l P_l^2(\cos \theta_x)$$

$$|J - J'| \leq l \leq |J + J'| \quad (1)$$

J, J' : ^{16}O 核の励起状態への遷移角運動量

θ_x : 反応平面上での q 方向からの粒子 X の放出角度

ϕ : 散乱平面と反応平面の間の角度

L は仮想光子の縦偏極成分, T は横偏極成分で, LT 項, TT 項は L と T, T と T の干渉項を表す。また, V_L, V_T, V_{LT}, V_{TT} は散乱電子系の運動学で決まる量であり, 原子核に関する情報は構造関数 W に含まれる。

W はルジャンドル関数 $P_l(x)$, ルジャンドル陪関数 $P_l^1(x), P_l^2(x)$ と係数 b_l, c_l, d_l で表される。ここで, 運動量移行 q が 0 に近い本実験条件では L 項が主要と考えられるが, その L 項の係数 b_l は次で表される。

$$b_l = \sum_{JJ'LL'S} A_{l(S;LJ,L'J')} M_{JJ'(S;LL')}^l \langle J \| \hat{M}_J \| 0 \rangle^* \langle J' \| \hat{M}_{J'} \| 0 \rangle \quad (2)$$

S : 放出粒子と残留核の間の合計スピン

L, L' : 放出粒子と残留核の間の相対軌道角運動量

A_l は Wigner 3j - symbol や 6j - symbol から成る量で, S, L, J, L', J' から explicit に決まる量である。 $M_{JJ'}^l$ は放出粒子 X の分岐比と Breit-Wigner 型の共鳴の形状に起因する量である。 $\langle J \| \hat{M}_J \| 0 \rangle$ は ^{16}O 核の基底状態と励起状態の間の仮想光子縦成分による遷移行列要素である。ここで, 放出粒子のアイソスピン依存性は次で表される⁶⁾。

$$\langle J \| \hat{M}_J \| 0 \rangle_{(\tau_{3i})} = \sum_{T=0,1} \left(\frac{1}{2} \tau_{3i} - \tau_{3i} | T 0 \right) \langle J \| \hat{M}_J \| 0 \rangle_{(T)} \quad (3)$$

J は遷移の多重極度, T は共鳴状態のアイソスピン, τ_{3i} は放出粒子のアイソスピン第 3 成分で, 陽子を $\frac{1}{2}$, 中性子を $-\frac{1}{2}$ と定義している。上式中のクレブシュゴルダン係数は GDR, GQR に対して第 1 表の値をとる。

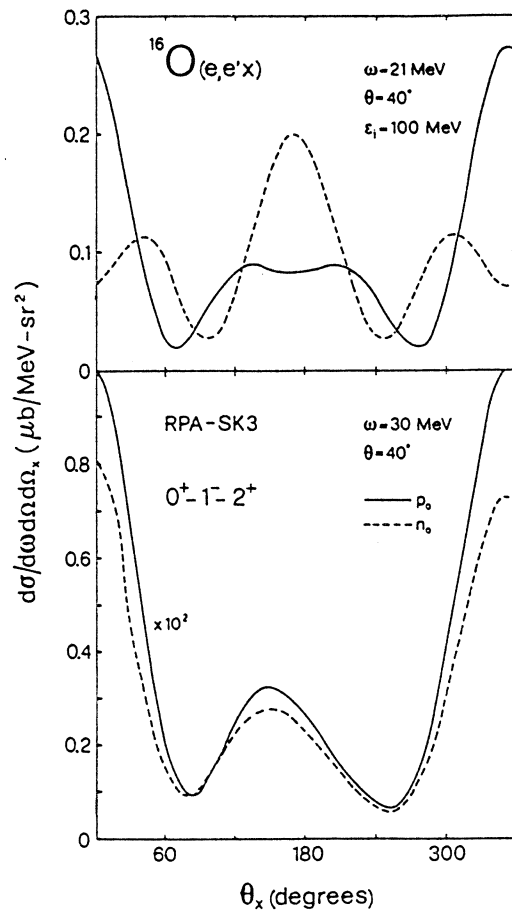
すなわち, GDR ($T=1$) とアイソスカラー GQR ($T=0$) の干渉項 b_1, b_3 は陽子と中性子で符号が逆転し, その効果が ^{16}O ($e, e'x$) 実験で測定される可能性があることがわかる。この干渉項はルジャンドル関数 $P_1(x)$ と $P_3(x)$ に依存するため, q 方向と反 q 方向の断面積の違いとして現れると考えられる。また, GDR とアイソベクトル GQR ($T=1$) の干渉では, 陽子と中性子で同符号となる。本研究では, この予測を確かめることを第 1 の目的としている。また, 残留核を励起状態に残す反応についても解析を行う。

理論面からは, Cavinato ら⁷⁾ により Sk 3 有効相互作用を用いた RPA 理論計算で第 1 図に示す ^{16}O ($e, e'x$) 角分布が得られている。これは本実験に近い運動量移行での計算結果である。彼らは, $\omega=21\text{MeV}$ では GDR と GQR ($T=0$) との干渉により n_0 と p_0 で著しい角分布の違いが q 方向と反 q 方向において見られ, $\omega=30\text{MeV}$ では GDR と GQR ($T=1$) の干渉

により n_0 と p_0 での角分布は類似したものになると予測している。

第1表 クレブシュゴルダン係数の値。

	GDR ($T=1$)	GQR ($T=0$)	GQR ($T=1$)
陽子	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
中性子	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$



第1図 Caviantoら⁷⁾による $(e, e'x)$ 角分布理論計算結果。

§ 2. 実験方法

実験は1993年5月12日～20日にわたり東北大学理学部原子核理学研究施設で、パルスビームストレッチャーからの129MeV, 100nAの連続電子線を用いて行われた。連続電子線は散乱槽の中心に設置されたLi₂O (100.6mg/cm²) ターゲットに照射された。散乱された電子は散乱角30°の位置にある電子線スペクトロメータ (LDM) にて運動量分析された。また、ターゲットからの放出中性子は、散乱槽の周りにターゲットから1mの距離で囲むように設置された10台の中性子検出器により検出され、TOF法を使ってそのエネルギーを測定した。中性子検出器は直径18cm厚さ10.5cmの円筒の容器に入れられた液体シンチレータNE 213と光電子増倍管R 1250から成っており、NE 213は波形弁別により中性子とγ線の弁別が容易であるという優れた特徴を持つ。

実験は on-plane ($\phi = 180^\circ$) で行われた。その条件を第2表にまとめる。また、中性子検出器の設置条件を第3表にまとめる。

第2表 実験条件。

入射電子エネルギー	129MeV
散乱電子角度	30°
励起エネルギー領域	20～30MeV
運動量移行	0.327～0.333fm ⁻¹

第3表 中性子検出器の設置条件。

No.	θ_n (deg)	TOF(cm)	立体角(msr)	²⁰⁹ Bi板の厚さ(cm)	コリメータ ϕ (cm)
1	49.4	105.8	22.7	6.0	16, 18, 18, 20
2	69.5	105.8	22.7	4.0	16, 18, 18, 20
3	89.7	105.9	22.7	4.0	16, 18, 18, 20
4	112.2	106.1	27.9	4.0	18, 18, 20, 20
5	133.1	106.3	22.5	4.0	16, 16, 18, 18
6	155.6	106.2	27.9	4.0	18, 18, 20, 20
7	208.6	105.2	23.0	4.0	16, 16, 18, 18
8	228.9	104.6	23.3	4.0	16, 16, 18, 18
9	249.5	105.4	22.9	4.0	16, 18, 18, 20
10	269.8	105.4	22.9	4.0	16, 18, 18, 20

§. 3 解析と結果

第2図に $^{16}\text{O}(e, e'n)$ 反応の励起崩壊図 ($n_0 \sim n_4$ に限る) を、第3図に得られたミッシングエネルギー分布を示す。ミッシングエネルギーは次式

$$E_m = E_i - E_f - E_x - E_r \quad (4)$$

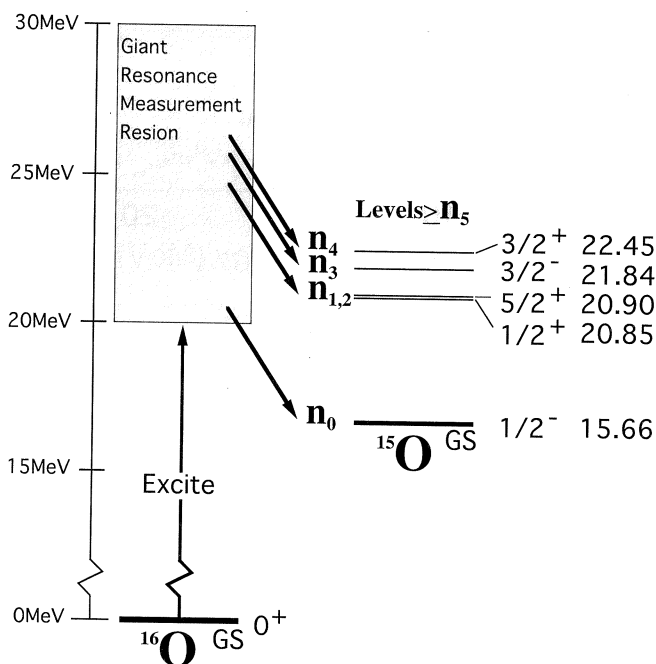
E_i : 入射電子エネルギー

E_f : 散乱電子エネルギー

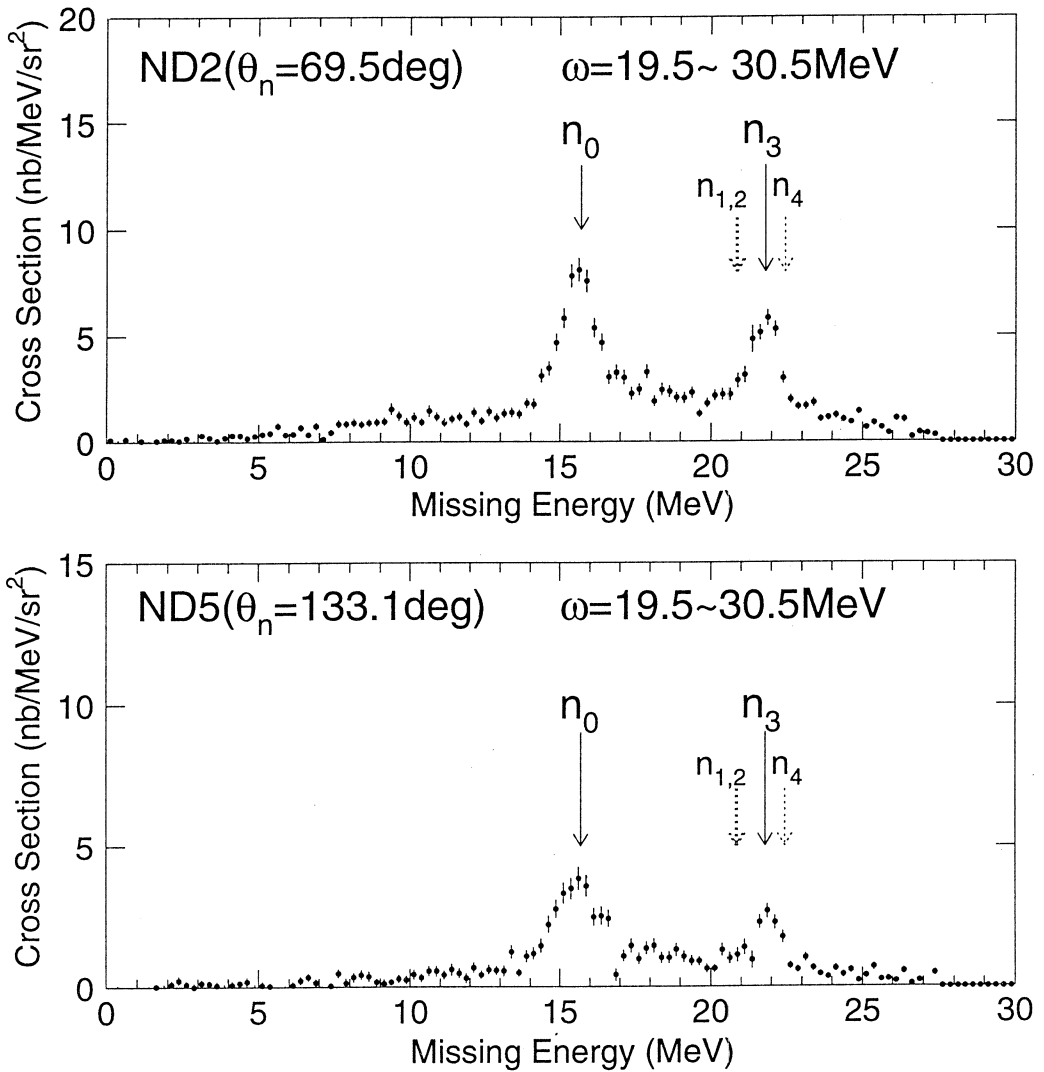
E_x : 放出粒子 X の運動エネルギー

E_r : 残留核の反跳エネルギー

で定義される量で、これは残留核の励起エネルギーに標的核の中性子放出しきい値を加えた量に相当する。 $E_m = 15.7\text{MeV}$ に n_0 が、 21.8MeV に n_3 のピークが確認できる。 n_3 の存在は、このとき残留核 ^{15}O が $J^\pi = \frac{3}{2}^-$ で、 $(1p_{1/2}, 1p_{3/2}^-)$ 配位であると考えられることから、巨大共鳴が $1p - 1h$ 状態のコヒーレントな重ね合わせであることの妥当性を示すものである。また、残留核 ^{15}O が+パリティをもつ n_1, n_2, n_4 事象はピークとして観測されなかった。一方、 $^{16}\text{O}(\gamma, n\gamma)$ 反応⁸⁾ による測定では、 $\omega = 0 \sim 28.7\text{MeV}$ で、断面積にして $n_0 : (n_1 + n_2)$:



第2図 $^{16}\text{O}(e, e'n)$ 反応励起崩壊図 ($n_0 \sim n_4$)。



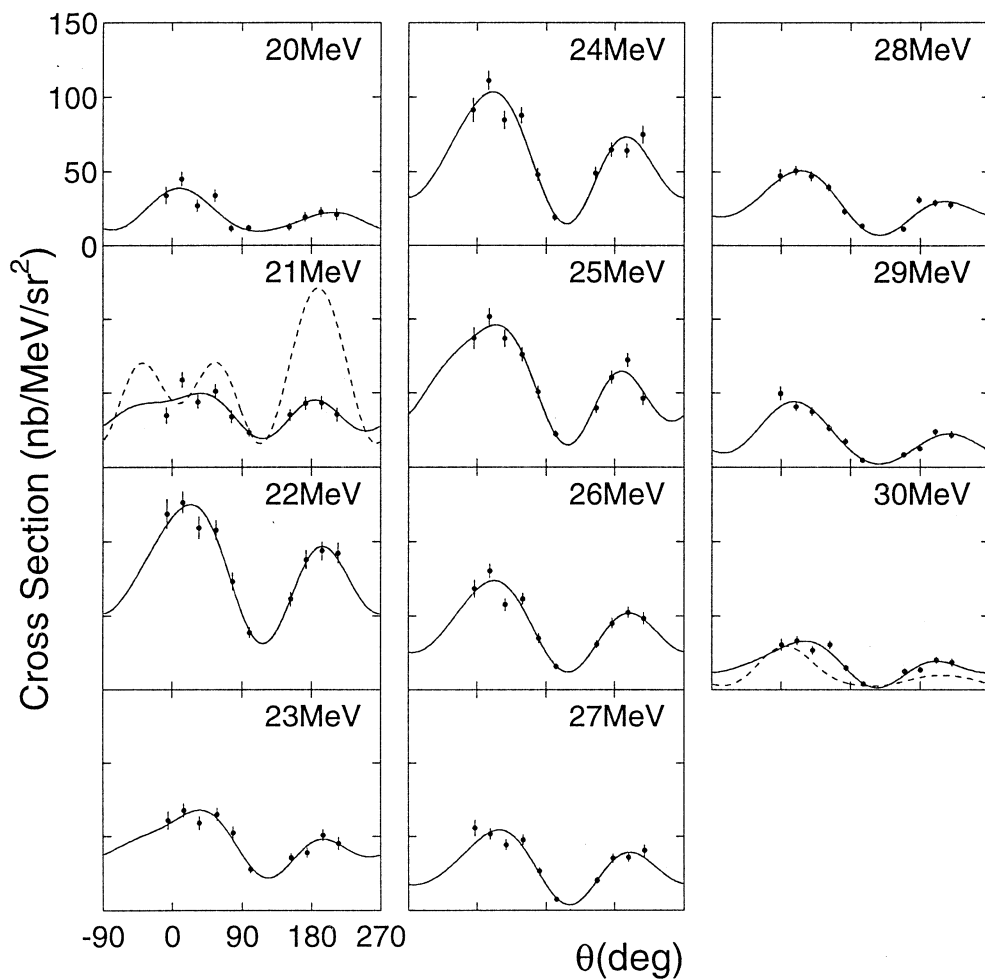
第3図 ミッシングエネルギー分布。

$n_3 : n_4 = 26.7 : 3.49 : 9.43 : 4.50$ (MeV mb) の値が得られており、 n_{1+2} や n_4 が観測されている点で本実験と異なっている。

なお、ターゲットとして Li_2O を用いているため ${}^7\text{Li}$ 核の影響が考えられるが、 ${}^7\text{Li}$ ターゲットでの測定データを解析したところ ${}^7\text{Li}$ ($e, e'n$) 反応断面積は ${}^{16}\text{O}$ ($e, e'n$) のそれに比べて小さく、無視しうるものと判断した⁹⁾。

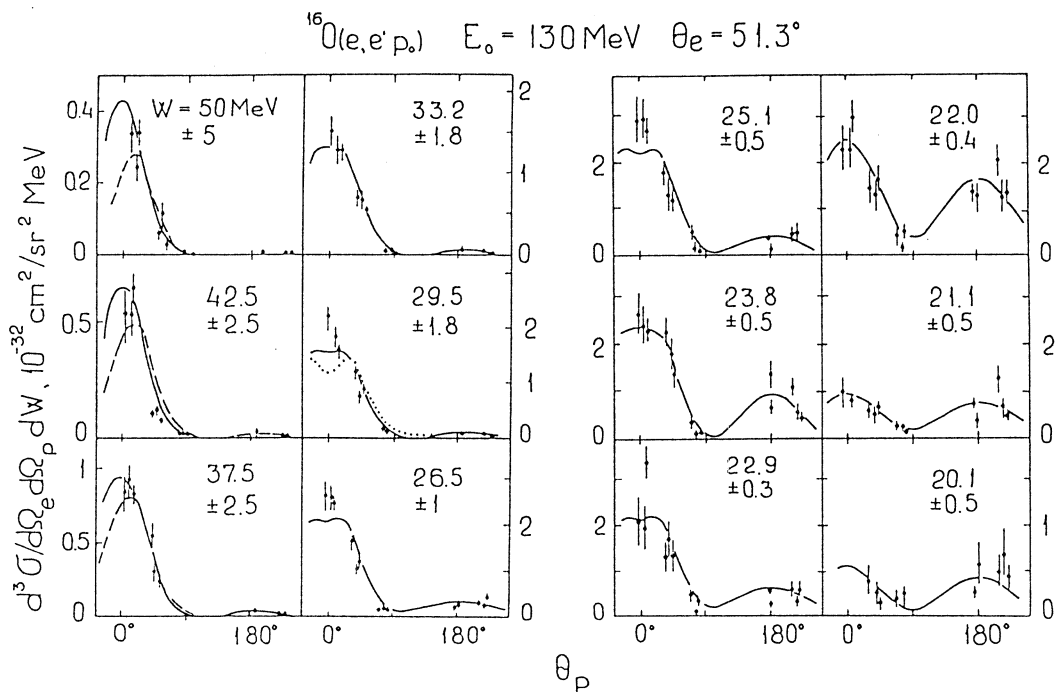
以下の議論では、 ${}^{16}\text{O}$ ではこれまでの実験で示唆されていない単極子巨大共鳴 (GMR) は考慮せず、巨大共鳴として GDR (E1 励起) と GQR (E2 励起) のみを考慮することにする。

第4図に ^{16}O ($e, e' n_0$) 角分布の結果を示す。角度 θ は q 方向からの値である（以下の角分布も同上）。実線は後に示すルジャンドル関数で χ^2 フィットしたものである。点線は Cavinato らによる理論計算を $\theta = 0^\circ$ 点で実線の値に規格化したものである。また、第5図には Dmitriev ら¹⁰⁾ による ^{16}O ($e, e' p_0$) 角分布の結果を示す。ただし、この角分布は本実験に比べやや大きい運動量移行 ($q = 0.53 \text{ fm}^{-1}$) のデータである。 ^{16}O ($e, e' p_0$) は類似した傾向であることがわかる。 $\omega = 20 \sim 30 \text{ MeV}$ において、ともに q 方向、反 q 方向にピークをもつ E1 共鳴が主要な角分布となっている。また、それらのピークには E2 共鳴によると考えられる非対称性がある。



第4図 ^{16}O ($e, e' n_0$) 角分布。

実線はルジャンドル関数でフィットしたものである。破線は Cavinato ら⁷⁾ による RPA 計算結果であり、 0° で実線に規格化してある。(角度 θ は q 方向からの値)



第5図 $^{16}\text{O}(e, e' p_0)$ 角分布。

実線は E1 共鳴と準弾性散乱過程を合わせた関数でフィットしたものである。(角度 θ は q 方向からの値)

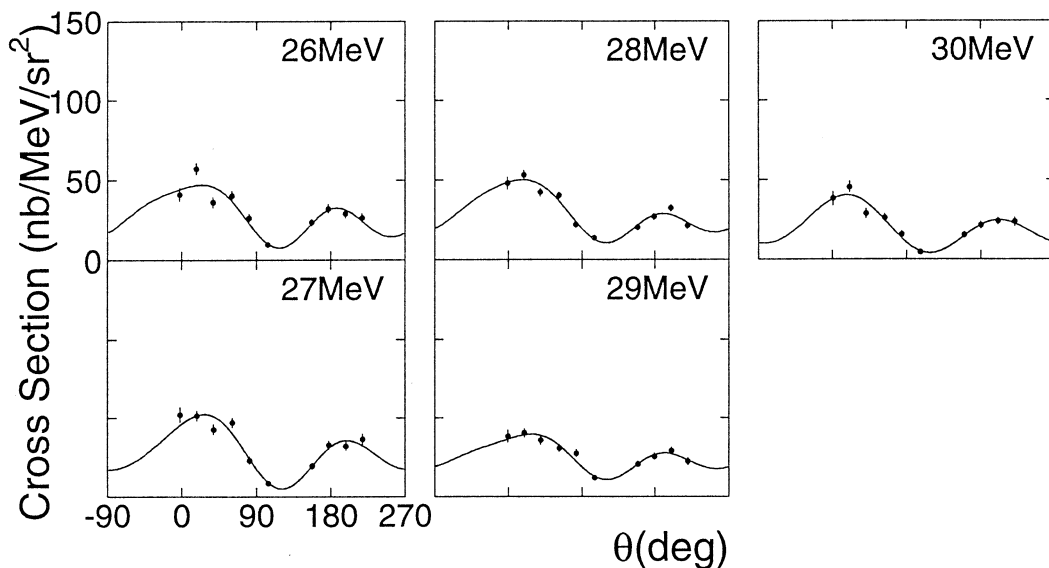
低い ω 領域では、放出粒子のアイソスピンの違いによる角分布の違いは見られなかった。 $\omega = 21 \text{ MeV}$ では $(e, e' n_0)$, $(e, e' p_0)$ とともに q 方向, 反 q 方向の非対称性が特に小さいという点で一致している。Cavinato らの理論計算のような, n_0 と p_0 での大きな違いは現れていない。一方, 高い ω 領域では, $(e, e' n_0)$, $(e, e' p_0)$ とともに q 方向ピークが反 q 方向ピークよりも大きいという類似した非対称性であり, これは GDR とアイソベクトル GQR の干渉効果からの予測と一致している。また, Cavinato らの理論計算とも傾向は一致している。

第6図に, $(e, e' n_3)$ 角分布の結果を示す。 n_0 事象と比べて, 同じ ω 領域で類似した結果が得られた。

第(1)式の様に, $(e, e' x)$ 反応角分布はルジャンドル関数により表すことができる。GDR と GQR を考える ($1 \leq J, J' \leq 2$) と, $0 \leq l \leq 4$ となり, $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4, d_2, d_3, d_4$ のパラメータが存在する。

まず, 本実験条件では横成分の割合は Siegert 定理¹¹⁾ により

$$\delta = (V_T/V_L) |T1(q)/C1(q)|^2 = 12 \sim 31\% \quad (5)$$



第6図 ^{16}O ($e, e' n_3$) 角分布。
実線はルジャンドル関数でフィットしたもの (角度 θ は q 方向からの値)。

であり、横成分どうしの干渉項 d_2, d_3, d_4 は小さいとして省略した。さらに、 ^{16}O (e, e') 実験による形状因子の測定結果¹²⁾ から、四重極成分は双極子成分に比して小さく、横成分と縦成分の四重極振動成分と、縦-横干渉項成分のうち双極子成分どうしの干渉を含む c_2 以外は小さいと考えられ、省略する。

その結果、散乱電子系の係数 V もパラメータに組み込んで、以下の関数で角分布を χ^2 フィットした。

$$\frac{d^3\sigma}{d\omega d\Omega_e d\Omega_x} = b_0 \{1 + b_1 P_1(x) + b_2 P_2(x) + b_3 P_3(x) - c_2 P_2^1(x)\} \quad (6)$$

$$x = \cos \theta_x$$

$$\phi = 180^\circ$$

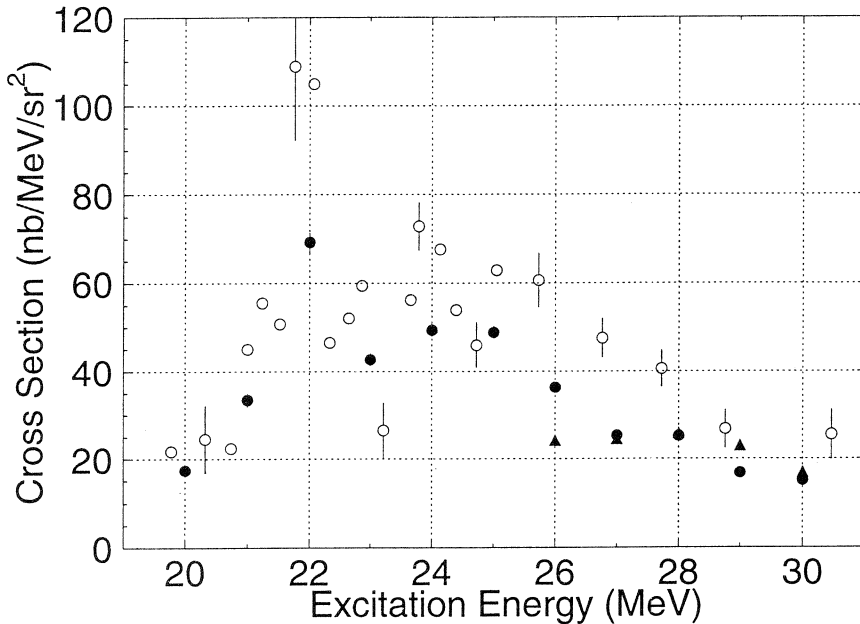
パラメータは、 b_0, b_1, b_2, b_3, c_2 の5つである。

第7図は、パラメータ b_0 をプロットしたものである。白丸で示された ^{16}O ($e, e' p_0$) データは Dmitriev ら¹⁰⁾ によるもので、Mott 断面積部分を本実験の運動学に合わせて変えた値をプロットしている。ただし、運動量移行が本実験よりもやや大きく ($q=0.53\text{fm}^{-1}$)、大きさは厳密には比較できない。しかし、ともに22MeV, 24MeV 付近にピークが見られる点で一致している。24MeV ピークに比しての22MeV ピークの大きさは、($e, e' p_0$) のほうが ($e, e' n_0$) よりも大きい。これは (γ, p_0), (γ, n_0) 反応での結果¹³⁾ と同じである。($e, e' n_3$) 断面積

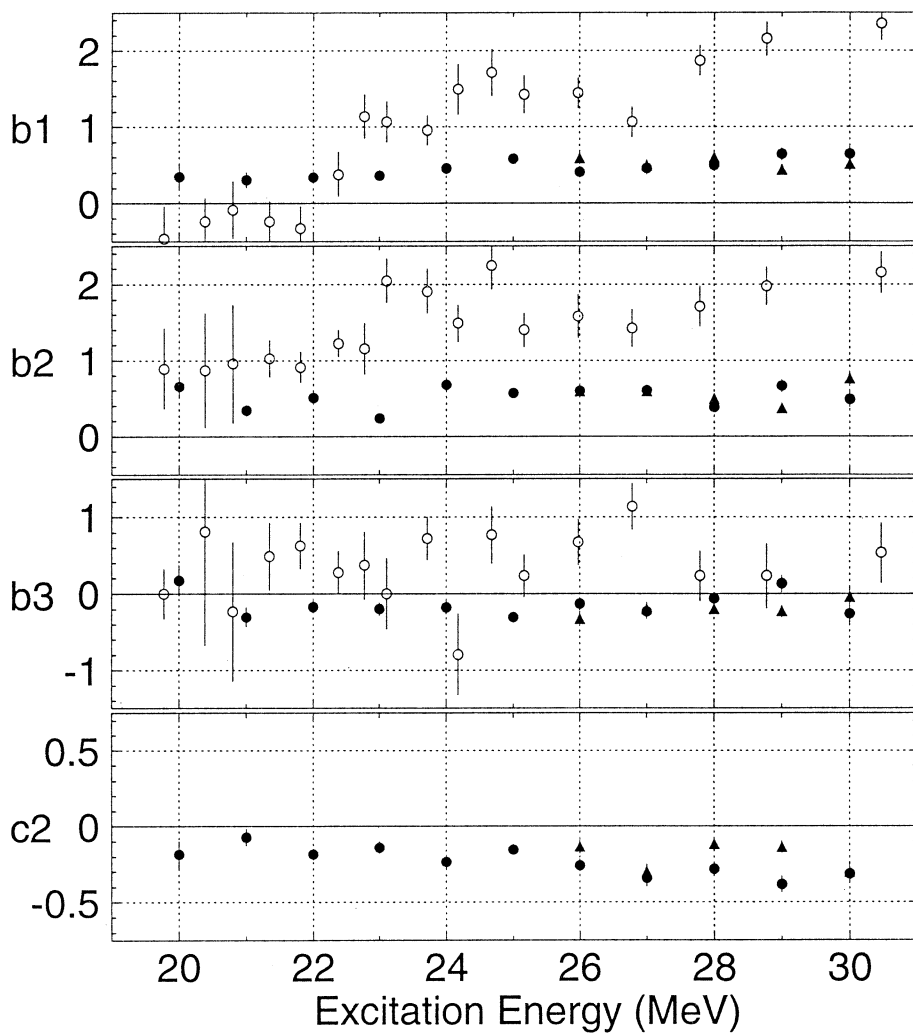
は、 $\omega = 26, 29\text{MeV}$ 以外はほぼ $(e, e' n_0)$ と同じ大きさであった。 $\omega = 26\text{MeV}$ では $n_0 : n_3 = 1 : 0.67$ であった。これは Dmitriev らの $(e, e' p)$ 測定による値 $p_0 : p_3 = 1 : 0.73$ に近いが、 $(e, e' p)$ 反応では、 $\omega = 25 \sim 30\text{MeV}$ において先の比で一定という結果になっている。また、 $\omega = 29\text{MeV}$ の $(e, e' n)$ 反応では n_0 よりも n_3 の方が断面積が大きくなっている。

第8図はパラメータ b_1, b_2, b_3, c_2 をプロットしたものである。 b_1, b_3 は E1 と E2 の干渉による項である。 b_1, b_3 は $(e, e' n_0), (e, e' p_0)$ とともに励起エネルギーが上がるにつれて増加する結果が得られている。また、 $(e, e' p_0)$ は $(e, e' n_0)$ よりも大きな値となっていて、準弾性散乱過程の影響が考えられる。Dmitriev らは、E1 共鳴と準弾性散乱過程を合わせた関数で $(e, e' p_0)$ 角分布を χ^2 フィットしており、 $\omega = 24 \sim 27\text{MeV}$ を除いては、ほぼ再現されるという結果を得ている。また $\omega = 24 \sim 27\text{MeV}$ では E2 共鳴を考慮する必要があるとしている。

b_3 は b_1 とは異なる振る舞いを示している。全体として $(e, e' n_0)$ は負符号であるのに対し、 $(e, e' p_0)$ は正符号をとっている。角分布の放出粒子のアイソスピン依存性を考えると、GDR とアイソスカラー GQR が干渉するときには b_1 と b_3 は $(e, e' p_0)$ と $(e, e' n_0)$ で逆符号に、GDR とアイソベクトル GQR が干渉するときには同符号になると考えられるが、実験結果はそうはならなかった。やはり $(e, e' p_0)$ 反応では準弾性散乱過程の影響を考慮せなければならぬと考えられる。



第7図 パラメータ b_{20}
 黒丸は $(e, e' n_0)$, 三角は $(e, e' n_3)$, 白丸は $(e, e' p_0)$ を表す。



第8図 パラメータ b_1 , b_2 , b_3 , c_{20}
 黒丸は $(e, e' n_0)$, 三角は $(e, e' n_3)$, 白丸は $(e, e' p_0)$ を表す。

同じ多重極度の遷移行列要素の積から構成される b_2 に関しては、 p_0 事象が励起エネルギーにつれて上昇するのに対し、 n_0 事象はその傾向はみられなかった。

c_2 は、縦成分と横成分の干渉から成る項である。

n_3 は、 n_0 と角分布が類似していたことを反映して、どのパラメータも n_0 に近い値であった。

§ 4. まとめ

^{16}O 核巨大共鳴領域での放出粒子のアイソスピンの違いによる ^{16}O $(e, e' n_0)$ と ^{16}O $(e, e' p_0)$ 反応の角分布の違いを確かめることを目的として ^{16}O $(e, e' n)$ 反応の測定を行った。

実験条件は励起エネルギー20~30MeV, 運動量移行 $\sim 0.33\text{fm}^{-1}$ とした。

GDR とアイソスカラー GQR の干渉により低エネルギー領域では n_0 角分布と p_0 のそれが異なると予想されたが, その傾向は認められなかった。一方, 高励起エネルギー領域では GDR とアイソベクトル GQR の干渉により両者は類似した角分布をもつと予想され, 実験結果はともに q 方向に大きなピークをもつ類似した分布であった。ただし, $(e, e' p_0)$ 反応角分布では前方ピークに寄与する準弾性散乱過程の影響を考慮する必要があると思われる。

また, 残留核 ^{15}O が励起状態に残される反応では, ^{15}O が $-$ パリティである n_3 事象は観測されたが, $+$ パリティである n_1, n_2, n_4 事象は見られなかった。 $(e, e' n_3)$ 反応断面積は同じ励起エネルギーでの $(e, e' n_0)$ のそれと同程度の大きさであり, 角分布もよく似ているという結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) K.T.Knöpfler, G. J. Wagner, P. Paul, H. Breuer and C. M-Böricke : Phys. Lett. **74B** (1978) 191.
- 2) J. P. Fritsch, H. J. Emrich, A. Grasmddotuck, R. Neuhausen and S. Schardt : Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 1667.
- 3) S. S. Hanna, H. F. Glavish, R. Avida, J. R. Calarco and E. Kuhlmann : Phys. Rev. Lett. **32** (1974) 114.
- 4) S. W. Wissink, S. S. Hanna, D. G. Mavis and T. R. Wang : Phys. Rev. C **37** (1988) 2289.
- 5) W. E. Kleppinger and J. D. Walecka : Ann. Phys. **146** (1983) 349.
- 6) A. M. Saruis : Phys. Rep. **235** (1993) 57.
- 7) M. Cavinato, M. Marangoni and A. M. Saruis : Phys. Lett. **163B** (1985) 49.
- 8) J. T. Caldwell, S. C. Fultz and R. L. Bramblett : Phys. Rev. Lett. **9** (1967) 447.
- 9) 木野 幸一 : 修士論文 東北大学 1996.
- 10) V. F. Dmitriev, D. M. Nikolenko, S. G. Popov, I. A. Rachek and D. K. Toporkov : Nucl. Phys. **A464** (1987) 237.
- 11) T. Deforest Jr and J. D. Walecka : Adv. in Phys. (1966) .
- 12) A. Hotta, K. Itoh and T. Saito : Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 790.
- 13) E. G. Fuller : Phys. Rep. **127** (1985) 185.

II. 放 射 化 学

Replacement Reaction of Ruthenium Recoil Atoms in Solid Ruthenocene Derivative Complexes

T. Sekine, I. Yamaguchi and H. Kudo

*Department of Chemistry, Graduate School of Science,
Tohoku University, Sendai 980-77, Japan*

Replacement reactions of ruthenium recoil atoms have been studied with ^{97}Ru and ^{103}Ru recoil atoms produced by (γ , n) reactions in solid ruthenocene derivative complexes and their cyclodextrin inclusion compounds. The replacement reaction yields were inversely proportional to the square root of the average distance between two adjacent ruthenocene derivative molecules in solids. This relation was successfully explained by the replacement reaction model introducing the attacking probability ; a probability of recoil atoms to attack the central atoms in ruthenocene derivative molecules through the geometrical open area of the sandwich structure.

§ 1. Introduction

Chemical reactions of energetic recoil atoms produced by nuclear transformations are widely used to synthesize new compounds and labeled complexes with radioactive elements. To understand the reaction mechanisms of recoil labeling, a number of studies have been carried out on the recoil labeling with metallocenes, famous organometallic compounds of sandwich structure¹⁾. Reactions of recoil atoms, for example, were examined in the mixed crystals of ferrocene, ruthenocene and osmocene²⁾. A steric effect of target compounds was studied using bridged ferrocenes by Hillman *et al.*³⁾, and they observed a marked decrease of the labeling yield with an increase of the numbers of (-CH₂-CH₂-CH₂-) bridges. Harbottle *et al.* reported a phase effect using ruthenocene in solids and solutions⁴⁾. Yoshihara *et al.* reported the recoil energy dependence of labeling yields for solid systems of ferrocene, ruthenocene and osmocene⁵⁾. Despite many efforts, however, much remains to be studied for understanding the factors controlling the labeling yield in solid-state reactions.

In nuclear recoil reactions in solids, the labeling yield of the parent compound includes fractions not only from a replacement process, but also from other processes such as a recombination process, depending on the kinetic energy of recoil atoms⁶⁾. It is difficult to analyze the reaction processes in solids by using a normal type of metallocene (MCp_2 , Cp = cyclopentadienyl) as targets, because only the labeling yield of metallocene is experimentally determined as a total yield of elementary processes.

The use of metallocene derivative complexes, which have different types of ligands of cyclopentadienyl derivatives in a molecule, makes it possible to investigate the reaction processes by analyzing the labeling yields for different metallocene derivatives. In this work, we chose ruthenocene derivative complexes ($\text{RuCp}'\text{Cp}''$; Cp' and Cp'' = cyclopentadienyl derivatives) such as (η -cyclopentadienyl) (η -acylcyclopentadienyl) ruthenium, (η -cyanocyclopentadienyl) (η -acylcyclopentadienyl) ruthenium, (η -bromocyclopentadienyl) (η -acylcyclopentadienyl) ruthenium, (η -pentamethylcyclopentadienyl) (η -acylcyclopentadienyl) ruthenium as the target compounds. The ruthenium recoil atoms, $^*\text{Ru}$ (^{97}Ru and ^{103}Ru) produced by (γ, n) reactions would form such three types of labeled complexes as $^*\text{RuCp}'_2$, $^*\text{RuCp}'\text{Cp}''$ (parent compound) and $^*\text{RuCp}''_2$. Extracting the replacement reaction yield, we discuss the solid-state chemical reactions of ruthenium recoil atoms, focusing on the replacement reaction. Furthermore, we discuss the replacement reaction mechanism in the cyclodextrin (CD) inclusion compounds of ruthenocene derivatives, in which the derivative molecule is isolated each other by the surrounding cyclodextrin wall.

§ 2. A Replacement Reaction Model of Ruthenium Recoil Atoms in Solid Ruthenocene Derivative Complexes

In the replacement reaction of ruthenium atoms recoiled from $\text{RuCp}'\text{Cp}''$ in solids, the recoil atom collides with other ruthenocene derivative complexes in the vicinity of a site where the recoil atom stops, losing the kinetic energy and replacing the central metal atom in the complex. It is conceivable that the replacement reaction is initiated by the attack of a recoil atom on the open area formed by the Cp' and Cp'' ligands in a molecule. Assuming that only this recoil atom takes part in the subsequent processes, the replacement reaction yield (Y_{rep}) is expressed as

$$Y_{\text{rep}} = P \times C, \quad (1)$$

where P is the attacking probability and C is the reaction probability of subsequent processes.

In considering the geometry of the molecule in solids, we can express the maximum attacking probability as

$$P = \frac{NS}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

where S is the cross section of the open area formed by Cp' and Cp'' ligands, R the mean range of recoil atoms, and N the number of ruthenocene derivative complexes lying on the spherical surface of radius R (Fig. 1).

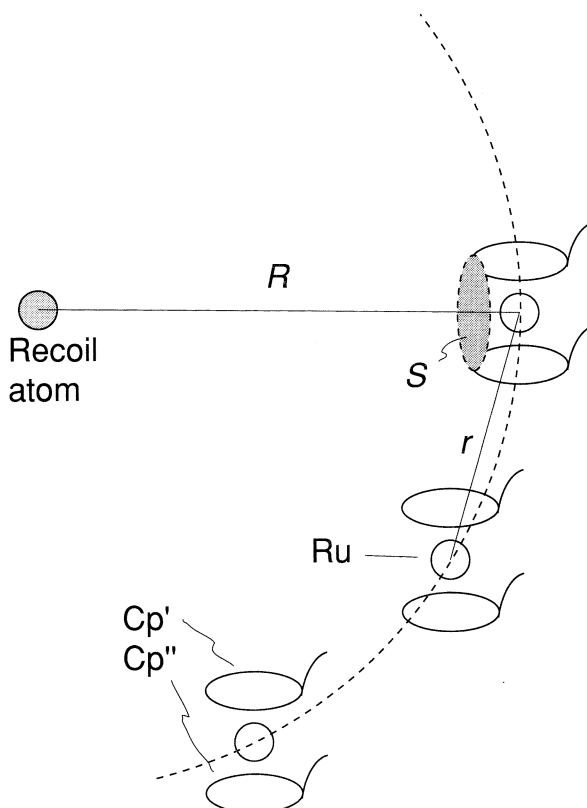


Fig. 1. A conceptual drawing of replacement reaction in ruthenocene derivatives.

R : mean range of a recoil atom,

r : average distance between neighboring molecules,

N : number of molecules lying at the mean range R ,

S : cross section of the open area formed by Cp' and Cp'' ligands.

The distance between the Cp' and Cp'' ligands is nearly the same in any ruthenocene derivative complexes ; *e. g.* 3.632 Å for ruthenocene⁷⁾, 3.616 Å for decamethylruthenocene⁸⁾ and 3.598 Å for decachlororuthenocene⁹⁾. The term S can be taken as a constant.

Assuming that a ruthenocene derivative complex is spherical, N is given as

$$N = \frac{\pi^2}{2\text{arc sin}^2\left(\frac{r}{2R}\right)}, \quad (3)$$

where r is the average distance between the two adjacent ruthenocene derivative molecules.

From Eqs. (2) and (3), the attacking probability is written as

$$P = \frac{\pi S}{8R^2\text{arc sin}^2\left(\frac{r}{2R}\right)}. \quad (4)$$

For $(r/2R) \ll 1$, the term $\text{arc sin}^2(r/2R)$ is written as

$$\text{arc sin}^2\left(\frac{r}{2R}\right) = \left(\frac{r}{2R}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{r}{2R}\right)^4 + \frac{8}{45}\left(\frac{r}{2R}\right)^6 + \dots, \quad (5)$$

and the attacking probability is written in a simple form as

$$P \cong \frac{\pi S}{2r^2}. \quad (6)$$

Thus, the attacking probability depends mainly on the average distance (r) between the two adjacent ruthenocene derivative molecules in solids, but not on the mean range (R) when $(r/2R) \ll 1$. As for the ruthenocene derivative complexes examined here, r changes from 0.7 to 1.0 nm depending on the length of acyl functional groups attached. The mean range of recoil ruthenium atoms produced by the (γ, n) reactions calculated by the LSS theory^{10, 11)} was from 8 to 11 nm; *i.e.* 8.8 nm in acetyl ruthenocene and 11.3 nm in decanoyl ruthenocene. The condition of $(r/2R) \ll 1$ is satisfied for the present system, and the maximum attacking probability is evaluated from Eq. (6). The attacking probability might depend also on the angle between the direction of incident recoil atoms and the plane of open area of molecules. Although the actual value would be smaller than the value calculated by Eq. (6), the r dependence of the attacking probability should be observed in experiments with various ruthenocene derivative complexes different in r .

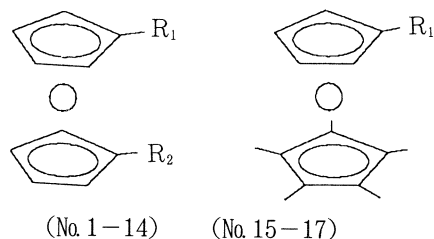
In addition, we have to take accounts of a reaction probability of the replacement

reaction ; not all of the recoil atoms entering into the molecule through open area replace the central ruthenium atom in the molecule. The latter factor included in C of Eq. (1) is evaluated by examining the correlation between the attacking probability and the experimentally obtained replacement yields, as discussed later in this paper.

§ 3. Experimental

Table 1 lists structural parameters of the solid ruthenocene derivatives used in the present study. Ruthenocene¹²⁾, cyanoruthenocene¹³⁾, bromoruthenocene¹⁴⁾ and

Table 1. Structural data for ruthenocene derivative complexes used in this study.



No.	R ₁	R ₂	Average distance* (r)/nm
1	COCH ₃	H	0.780
2	COCH ₂ CH ₃	H	0.829
3	CO(CH ₂) ₂ CH ₃	H	0.866
4	CO(CH ₂) ₃ CH ₃	H	0.892
5	CO(CH ₂) ₆ CH ₃	H	0.937
6	CO(CH ₂) ₈ CH ₃	H	0.993
7	CO(CH ₂) ₁₀ CH ₃	H	0.959
8	CO(CH ₂) ₁₂ CH ₃	H	0.984
9	CN	COCH ₃	0.854
10	CN	CO(CH ₂) ₈ CH ₃	0.974
11	CN	CO(CH ₂) ₁₂ CH ₃	1.012
12	Br	COCH ₃	0.921
13	Br	CO(CH ₂) ₈ CH ₃	1.017
14	Br	CO(CH ₂) ₁₂ CH ₃	1.067
15	COCH ₃	—	0.899
16	COCH ₂ CH ₃	—	0.919
17	CO(CH ₂) ₃ CH ₃	—	0.954

* see Fig. 1.

pentamethylruthenocene¹⁵⁾ were synthesized by the previously reported methods. Acylation of these ruthenocene derivative complexes was carried out by the reaction of the ruthenocene derivative complexes with alkylcarbonylchloride in the presence of aluminium chloride^{16, 17)}. The final products were purified by recrystallization from methanol or ethanol solution or by vacuum sublimation. Identification of the products was carried out by IR and ¹H NMR spectrometry as well as elemental analysis. The average distance between two adjacent ruthenocene derivative complexes (r), listed in Table 1, was calculated from the measured density and the molecular weight of each ruthenocene derivative complex. The density was determined using a picnometer with water-ethanol (v/v = 40/60) solution.

Structural parameters of solid CD inclusion compounds used in the present study are listed in Table 2. The CD inclusion compounds of ruthenocene derivatives were synthesized by a similar procedure reported by Harada *et al*¹⁸⁾, except for the compounds with pentamethylcyclopentadienyl ligand. Either β -CD or γ -CD was used as a host compound, the size of the ruthenocene derivative complex being taken into account. The compounds were purified by recrystallization from water or water-ethanol solution. The host guest ratio of these inclusion compounds, listed in Table 2, was determined by ¹H NMR spec-

Table 2. Structural data for ruthenocene derivative-CD inclusion compounds used in this study.

Guest Compound No.*	Host compound	Inclusion ratio**	Average distance (r) / nm
1	β -CD	1 : 1	1.442
2	β -CD	1 : 1	1.444
3	β -CD	1 : 2.3	1.444
4	β -CD	1 : 2.1	1.775
5	β -CD	1 : 2.5	1.912
6	β -CD	1 : 2.5	1.905
7	β -CD	1 : 2.7	1.932
8	β -CD	1 : 2.8	1.975
9	γ -CD	1 : 1	1.506
10	γ -CD	1 : 2.3	1.896
11	γ -CD	1 : 2.6	1.992
12	γ -CD	1 : 1	1.512
13	γ -CD	1 : 2.6	2.004
14	γ -CD	1 : 2.7	2.098

* Guest compound No. is indicated in Table 1.

** Inclusion ratio is expressed as guest : host.

trometry.

The target materials were irradiated for 7 h with γ -rays ($E_{\gamma\max} = 50$ MeV) generated by an electron linear accelerator of the Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. The target temperature was controlled below -100 °C by blowing chilled vapor from liquid nitrogen. The irradiated ruthenocene derivative complexes were dissolved in benzene, and the labeled species were chemically separated using a silica gel column. Irradiated CD inclusion compounds were dissolved in a small amount of dimethylformamide, and the solution was diluted with a large amount of benzene to precipitate CD which was separated by a centrifuge. The labeled species in the benzene phase were separated by silica gel chromatography. Radioactivities induced by the $^{98}\text{Ru}(\gamma, n)$, ^{97}Ru and $^{104}\text{Ru}(\gamma, n)$, ^{103}Ru reactions were measured with a multichannel γ -ray spectrometer equipped with a Ge detector.

§ 4. Results and Discussion

Tables 3 and 4 list the labeling yields of the ligand-rearranged products ($^*\text{RuCp}'_2$) and the parent compound ($^*\text{RuCp}'\text{Cp}''$) after the γ -ray irradiation of $\text{RuCp}'\text{Cp}''$ and of their CD inclusion compounds, respectively. Labeling yield (Y) is expressed as

$$Y = \frac{A_{\text{fraction}}}{A_{\text{total}}} \quad (7)$$

where A_{fraction} is the radioactivity in each fraction of ruthenocene derivative complexes and A_{total} is the total radioactivity of the irradiated sample. These two species were fairly separated¹⁹⁾, although unknown radioactivity in the fraction of $^*\text{RuCp}'_2$ was observed in the chromatograms. The yields of the parent complex were higher than those of the ligand-rearranged products. The result reveals that labeled complexes are mainly produced via the replacement reaction, because the replacement reaction gives only $^*\text{RuCp}'\text{Cp}''$ while ligand-rearranged products ($^*\text{RuCp}'_2$ and $^*\text{RuCp}''_2$) are formed through the other processes¹⁹⁾. It is noteworthy that the labeling yield of $^*\text{RuCp}'\text{Cp}''$ decreases with an increase of the r value (average distance between two adjacent molecules), although the yield of $^*\text{RuCp}'_2$ scatters around 0.5 % irrespective of target complexes.

Tables 5 and 6 list the replacement reaction yields (Y_{rep}) calculated from the yields of $^*\text{RuCp}'\text{Cp}''$ and $^*\text{RuCp}'_2$ in the same manner as described in the previous paper¹⁹⁾ for both

Table 3. Labeling yields of $^{97}\text{RuCp}'_2$ and $^{97}\text{RuCp}'\text{Cp}''$ for the γ -irradiated $\text{RuCp}'\text{Cp}''$.

Compound No.	Labeling yield / %			
	$^{97}\text{RuCp}'\text{Cp}''$	$^{97}\text{RuCp}'_2$	$^{103}\text{RuCp}'\text{Cp}''$	$^{103}\text{RuCp}'_2$
1	3.30 ± 0.05	0.59 ± 0.01	3.03 ± 0.07	0.55 ± 0.02
2	3.48 ± 0.22	0.77 ± 0.05	3.28 ± 0.32	0.75 ± 0.09
3	3.27 ± 0.03	0.59 ± 0.03	2.89 ± 0.11	0.72 ± 0.14
4	2.65 ± 0.13	0.55 ± 0.05	2.58 ± 0.11	0.64 ± 0.08
5	2.36 ± 0.11	0.43 ± 0.07	2.18 ± 0.09	0.42 ± 0.07
6	1.89 ± 0.18	0.54 ± 0.13	1.77 ± 0.08	0.55 ± 0.05
7	1.78 ± 0.10	0.44 ± 0.09	1.55 ± 0.09	0.42 ± 0.11
8	1.50 ± 0.02	0.38 ± 0.03	1.42 ± 0.10	0.38 ± 0.01
9	4.00 ± 0.29	0.82 ± 0.03	3.86 ± 0.13	0.88 ± 0.12
10	3.15 ± 0.21	0.87 ± 0.16	2.92 ± 0.16	0.83 ± 0.26
11	2.61 ± 0.33	0.69 ± 0.21	2.37 ± 0.18	0.61 ± 0.11
12	2.68 ± 0.37	0.66 ± 0.09	2.56 ± 0.22	0.62 ± 0.21
13	2.10 ± 0.09	0.58 ± 0.11	1.93 ± 0.07	0.53 ± 0.18
14	1.94 ± 0.40	0.56 ± 0.09	1.86 ± 0.22	0.54 ± 0.09
15	2.12 ± 0.23	0.16 ± 0.02	1.93 ± 0.13	0.20 ± 0.05
16	1.89 ± 0.13	0.19 ± 0.02	1.77 ± 0.21	0.24 ± 0.05
17	1.36 ± 0.09	0.17 ± 0.03	1.19 ± 0.21	0.16 ± 0.03

Table 4. Labeling yields of $^{97}\text{RuCp}'_2$ and $^{97}\text{RuCp}'\text{Cp}''$ for the γ -irradiated $\text{RuCp}'\text{Cp}''$ - CD inclusion compounds.

Compound No.	Labeling yield / %			
	$^{97}\text{RuCp}'\text{Cp}''$	$^{97}\text{RuCp}'_2$	$^{103}\text{RuCp}'\text{Cp}''$	$^{103}\text{RuCp}'_2$
1	0.59 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.59 ± 0.04	0.19 ± 0.01
2	0.71 ± 0.11	0.10 ± 0.05	0.84 ± 0.21	0.07 ± 0.05
3	0.34 ± 0.05	0.10 ± 0.03	0.38 ± 0.04	0.12 ± 0.02
4	0.37 ± 0.07	0.15 ± 0.02	0.34 ± 0.10	0.13 ± 0.04
5	0.18 ± 0.04	0.07 ± 0.02	0.24 ± 0.03	0.11 ± 0.03
6	0.15 ± 0.03	0.06 ± 0.01	0.14 ± 0.04	0.10 ± 0.02
7	0.12 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.20 ± 0.06	0.19 ± 0.08
8	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.08 ± 0.01
9	0.46 ± 0.08	0.10 ± 0.04	0.56 ± 0.06	0.12 ± 0.03
10	0.31 ± 0.09	0.12 ± 0.09	0.33 ± 0.07	0.09 ± 0.01
11	0.29 ± 0.13	0.08 ± 0.03	0.31 ± 0.11	0.07 ± 0.02
12	0.42 ± 0.06	0.12 ± 0.02	0.44 ± 0.06	0.14 ± 0.05
13	0.28 ± 0.06	0.09 ± 0.03	0.29 ± 0.07	0.10 ± 0.02
14	0.29 ± 0.06	0.13 ± 0.05	0.28 ± 0.07	0.15 ± 0.06

Table 5. Replacement reaction yield in γ -irradiated ruthenocene derivative complexes.

Compound No.	Average distance (r)/ nm	Replacement reaction yield / %	
		^{97}Ru	^{103}Ru
1	0.780	2.12 \pm 0.05	1.93 \pm 0.08
2	0.829	1.94 \pm 0.24	1.78 \pm 0.37
3	0.866	2.10 \pm 0.06	1.45 \pm 0.30
4	0.892	1.56 \pm 0.26	1.29 \pm 0.20
5	0.937	1.50 \pm 0.19	1.35 \pm 0.16
6	0.993	0.82 \pm 0.31	0.67 \pm 0.13
7	0.959	0.90 \pm 0.21	0.70 \pm 0.24
8	0.984	0.75 \pm 0.05	0.66 \pm 0.10
9	0.854	2.36 \pm 0.29	2.10 \pm 0.26
10	0.974	1.41 \pm 0.31	1.26 \pm 0.16
11	1.012	1.23 \pm 0.23	1.15 \pm 0.22
12	0.921	1.36 \pm 0.29	1.32 \pm 0.16
13	1.017	0.94 \pm 0.18	0.87 \pm 0.17
14	1.067	0.82 \pm 0.16	0.78 \pm 0.21
15	0.899	1.80 \pm 0.23	1.52 \pm 0.16
16	0.919	1.56 \pm 0.14	1.24 \pm 0.23
17	0.954	1.02 \pm 0.11	0.87 \pm 0.22

Table 6. Replacement reaction yield in γ -irradiated ruthenocene derivative-CD complexes.

Compound No.	Average distance (r)/ nm	Replacement reaction yield / %	
		^{97}Ru	^{103}Ru
1	1.442	0.35 \pm 0.03	0.21 \pm 0.04
2	1.444	0.25 \pm 0.15	0.40 \pm 0.23
3	1.444	0.13 \pm 0.09	0.15 \pm 0.05
4	1.775	0.08 \pm 0.09	0.08 \pm 0.07
5	1.912	0.04 \pm 0.05	0.02 \pm 0.03
6	1.905	0.02 \pm 0.04	0 \pm 0.04
7	1.932	0 \pm 0.06	0 \pm 0.06
8	1.975	0 \pm 0.06	0 \pm 0.08
9	1.506	0.26 \pm 0.11	0.32 \pm 0.08
10	1.896	0.07 \pm 0.20	0.15 \pm 0.07
11	1.992	0.13 \pm 0.14	0.17 \pm 0.12
12	1.512	0.18 \pm 0.07	0.16 \pm 0.12
13	2.004	0.10 \pm 0.08	0.09 \pm 0.08
14	2.098	0.03 \pm 0.12	0 \pm 0.06

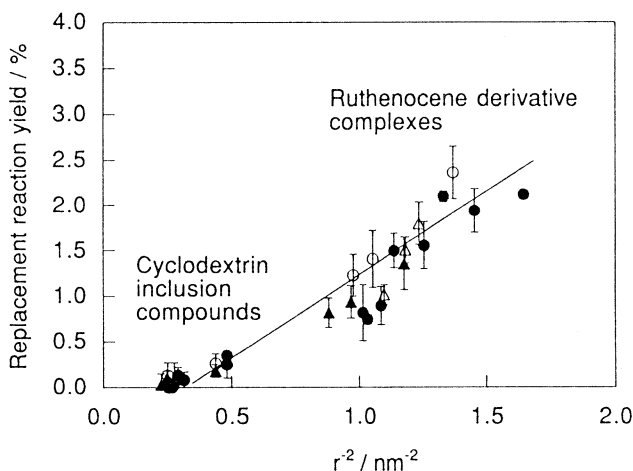


Fig. 2. r^{-2} - Dependence of replacement reaction yields of γ -irradiated ruthenocene derivatives and their CD inclusion compounds.

○ : cyanoruthenocene derivatives, ● : acylruthenocene derivatives,
 ▲ : bromoruthenocene derivatives, △ : pentamethylruthenocene derivatives.

the ruthenocene derivative complexes and the CD inclusion compounds. The replacement reaction yields of ^{97}Ru are plotted against r^{-2} in Fig. 2. As expected from Eq. (6), the attacking probability of recoil atoms is linearly proportional to r^{-2} . The same tendency was observed for that of ^{103}Ru . The linear relation between the replacement reaction yield and r^{-2} indicates that the replacement reaction yield of recoil atoms in ruthenocene derivative complexes is governed by the attacking probability. Namely, the recoil atom enters into the ruthenocene derivative molecule through the open area of the molecule and then replaces the central ruthenium atom.

The same explanation is possible for the ruthenocene derivative molecule isolated by the cavity of CD, because the plot of replacement reaction yields for the CD compounds in Fig. 2 are superimposed on the same line obtained for the ruthenocene derivative complexes. The molecular size of the CD compounds depends on the inclusion ratio; a guest molecule is included in the CD cavity in the 1 : 1 compounds, while guest molecules in the 1 : 2 or 1 : 3 compounds are sandwiched by two or three CD molecules¹⁸⁾ because of the ring-mismatching between the guest molecule and the cavity of CD. It is interesting that this structural difference does not contribute to the replacement reaction yields, while the average distance between two adjacent ruthenocene derivative molecules is a meaningful factor in governing the replacement reaction yields.

The importance of the bond strength between a central metal atom and ligands has been reported by Sekine *et al.* for the replacement reaction yields in solid β -diketonates for the recoil implantation reactions^{20, 21, 22}. The bond strengths in ruthenocene derivative complexes are in the order of cyanocyclopentadienyl < bromocyclopentadienyl < cyclopentadienyl < pentamethylcyclopentadienyl. In contrast to β -diketonates, the bond strength between the ruthenium atom and the ligands in ruthenocene derivative complexes played a minor role in determining the replacement reaction yield.

In Eq. (6), S is defined as the cross section of the open area formed by the Cp' and Cp'' ligands of a ruthenocene derivative molecule. This value is estimated from the crystal structural data of the ruthenocene molecule⁷ as 0.081 nm². The attacking probability calculated simply by Eq. (6) with $S = 0.081$ nm² was ranged from 0.03 to 0.21 in the present system. The calculated values are obviously higher than the experimental values for the present target complexes. The ratio of the observed replacement reaction yields (Y_{rep}) to the calculated attacking probability (P) was constant, $C = 0.10 + 0.02$. The fact indicates that the reaction probabilities are nearly the same for a series of the ruthenocene derivative complexes, independent of their functional groups, sizes and molecular isolation (in CD) in the systems. Conclusively, the attack of recoil atoms on the open area was indicated to play a significant role in the replacement reaction.

Acknowledgment

We wish to thank Dr. K. Masumoto, Dr. T. Ohtsuki and the crew of the Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, for their assistance in γ -irradiation of samples.

References

- 1) D.R. Wiles and F. Baumgärtner : *Chemical Effects of Nuclear Transformations in Inorganic Systems*, eds. G. Harbottle and A. G. Maddock, (North-Holland, Amsterdam, 1979) Chap. 13.
- 2) T. Yassine and R. Blackburn : *Radiat. Phys. Chem.* **33** (1989) 341.
- 3) M. Hillman, A. J. Weiss, H. Ebihara and K. Williams : *J. Inorg. Nucl. Chem.* **37** (1975) 403.

- 4) G. Harbottle and U. Zahn : *Symp. Chem. Effects of Nucl. Transformations*, (IAEA, Vienna 1965) Vol. 2, p. 133.
- 5) K. Yoshihara, T. Sekine and H. Matsue : *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B91** (1994) 103.
- 6) J. I. Vargas and A. G. Maddock : *Chemical Effects of Nuclear Transformations in Inorganic Systems*, eds. G. Harbottle and A. G. Maddock, (North-Holland, Amsterdam, 1979) Chap. 26.
- 7) G. L. Hardgrove and D. H. Templeton : *Acta Crystallogr* **12** (1959) 28.
- 8) D. C. Liles, A. Shaver, E. Singleton and M. B. Wiege : *J. Organomet. Chem.* **288** (1985) C33.
- 9) G. M. Brown, F. L. Hedberg and H. Rosenberg : *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* (1972) 5.
- 10) J. Lindhard, M. Scharff and H. E. Schiøtt : *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* **33** (14) (1963).
- 11) A. Miyakawa, T. Sekine and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **48** (1989) 11.
- 12) P. Pertici and G. Vittulli : *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* (1980) 1961.
- 13) G. D. Broadhead, J. M. Osgerby and P. L. Pauson : *J. Chem. Soc.* (1958) 650.
- 14) R. W. Fish and M. Rosenblum : *J. Org. Chem.* **30** (1965) 1253.
- 15) P. G. Gassman and C. H. Winter : *J. Am. Chem. Soc.* **110** (1988) 6130.
- 16) M. D. Raush, E. O. Fischer and H. Grubert : *J. Am. Chem. Soc.* **82** (1960) 76.
- 17) P. J. Graham, R. V. Lindsey, G. W. Parshall, M. L. Peterson and G. W. Whitman : *J. Am. Chem. Soc.* **79** (1957) 3416.
- 18) A. Harada, Y. Hu, S. Yamamoto and S. Takahashi : *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* (1988) 729.
- 19) H. Matsue, I. Yamaguchi, T. Sekine and K. Yoshihara : *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B91** (1994) 97.
- 20) T. Sekine and K. Yoshihara : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **105** (1986) 229.
- 21) T. Sekine, M. Sano and K. Yoshihara : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **107** (1986) 207.
- 22) T. Sekine and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **55** (1991) 65.

Recoil Properties of Radionuclides Formed in the Photonuclear Reactions on ^{nat}Cu at Intermediate Energies

H. Haba, H. Matsumura, Y. Miyamoto, K. Sakamoto¹,
Y. Oura², S. Shibata³, M. Furukawa⁴, and I. Fujiwara⁵

*Division of Physical Sciences, Graduate School of Natural Science and
Technology, Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa 920-11, Japan*

¹*Department of Chemistry, Faculty of Science, Kanazawa University,
Kanazawa, Ishikawa 920-11, Japan*

²*Department of Chemistry, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan
University, Hachioji-shi, Tokyo 192-03, Japan*

³*Research Reactor Institute, Kyoto University, Sennan-gun,
Osaka 590-04, Japan*

⁴*Department of Chemistry, Faculty of Science, Nagoya University,
Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan*

⁵*School of Economics, Otemongakuin University, Ibaragi, Osaka 567,
Japan*

The recoil properties of 26 nuclides, varying from ^{24}Na to ^{64}Cu , produced in the photonuclear reactions on ^{nat}Cu (nat : natural isotopic abundance) at bremsstrahlung end-point energies (E_0) of 250 to 1000 MeV have been investigated using the thick-target thick-catcher method. Kinematic properties of the product nuclei were calculated by the two-step vector velocity model. The obtained mean ranges smoothly increase with increase of the mass difference between products and target (ΔA), and show E_0 -independence at $E_0 \geq 600$ MeV indicating the limiting behavior above (3, 3) resonance region. The forward-to-backward ratios (F/B) of the all obtained nuclides are about 2-3. The calculated mean kinetic energies of spallation products increase with increase of ΔA , reflecting the resonance natures and absorption mechanisms. The obtained mean kinetic energies at $E_0 \geq 600$ MeV were well reproduced by a calculation performed by PICA code by Gabriel and Alsmiller at $E_0 \geq 400$ MeV, except for (γ , xn) products by giant-resonance.

§1. Introduction

We have been measuring the yields of bremsstrahlung-induced photopion reactions¹⁻⁴⁾, photospallation⁵⁻⁸⁾, photofragmentation⁹⁾, and/or photofission¹⁰⁾ from ${}^7\text{Li}$ to ${}^{209}\text{Bi}$ targets using radiochemical techniques in order to study the systematics of photonuclear reactions and to investigate reaction mechanisms and nuclear structure. Many fruitful informations about these aspects have been obtained so far, but all based on the yield measurements of reaction products.

Nuclear recoil experiments are expected to give us additional informations related to reaction mechanisms such as angular distributions and/or kinetic energies of product nuclei. One of the simplest recoil experiments is the thick-target thick-catcher experiment, and it has been often used for hadron-induced reaction over a wide energy range. However only a few works using this technique are available for the study of photonuclear reaction. The initial interaction between photon and nucleus is purely electromagnetic, and is quite different from that for hadron induced reactions. It is very interesting how this difference is reflected to recoil properties.

We have applied this technique to photonuclear reactions on ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$ (nat : natural isotopic abundance) for bremsstrahlung end-point energies (E_0) of $E_0=250\text{-}1000$ MeV from the 1.3 GeV electron synchrotron of the Institute for Nuclear Study (INS), University of Tokyo, because its yield measurements have been well investigated at $E_0=100\text{-}1000$ MeV by Shibata *et al*⁵⁾. in our group. The results obtained in this work will be discussed by referring to the previous literature values on ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$ at $E_0=800$ MeV by Järund *et al*¹¹⁾., ${}^{65}\text{Cu}$ at $E_0=4.5$ GeV by Arakelyan *et al*¹²⁾., and also PICA (Photon-induced Intranuclear Cascade Analysis) calculation by Gabriel and Alsmiller^{13,14)} at $E_0=400$ MeV. Recently an additional measurement at $E_0=65$ MeV was performed by using the 300 MeV electron linac of the Laboratory of Nuclear Science (LNS) of Tohoku University, however, the results are preliminary at present and will be reported in a separate paper together with the recoil property of ${}^{65}\text{Cu}(\gamma, n){}^{64}\text{Cu}$ reaction at $E_0=50$ MeV by Shibata *et al*¹⁵⁾.

§2. Experimental

The irradiations at $E_0=250\text{-}1000$ MeV were carried out by the 1.3 GeV electron syn-

chrotron of INS. The target stack consisted of a pile of 20–50 foils of high-purity (99.99 %) ^{nat}Cu of 23 mg/cm^2 in thickness, each sandwiched between one pair of 3.5 mg/cm^2 thick Mylar foils, which collected the recoil nuclei in the forward or backward directions. The stack included additional Mylar foils to serve as an activation blank. The contribution of the blank to the catcher foil activity was found to be negligible except for ^{24}Na (30% at $E_0 \geq 600 \text{ MeV}$). The entire stack was irradiated in an Al-made vacuum chamber or in air, and the obtained results from both the irradiations were consistent with each other. The photon intensities were 10^8 - 10^9 eq.q./sec. as deduced from monitor reactions of ^{27}Al (γ , 2pn) $^{24}\text{Na}^{16,17}$ in the same irradiation as the target. After irradiation the γ -ray spectrometry of radionuclides of interest was performed nondestructively for all the catcher foils as one sample and some selected Cu targets together as another one from one target pile. The identification of radionuclides was made from their γ -ray energies and half-lives.

§ 3. Results and Discussion

The radioactivities of 26 radionuclides, varying from ^{24}Na to ^{64}Cu , produced by photonuclear reactions on ^{nat}Cu were identified in both the target foils and catcher foils. The results of these measurements are the fractions of each nuclide which have recoiled out of a target foil of thickness $W \text{ mg/cm}^2$ in the forward and backward directions, denoted by F and B , respectively. Kinematic properties of the product nuclei were calculated by the two-step vector velocity model developed by Winsberg¹⁸⁾ for the thick-target thick-catcher method. Here the velocity of the recoiling residual nucleus is taken to be the sum of a forward velocity v imparted in the first step to an intermediate nucleus and a velocity V imparted in the second step to the residual nucleus. With the additional assumptions ; (1) v is directed along the beam, (2) V is taken to be isotropic, and (3) the range-energy relation of the recoiling nuclei is approximated as $R=KV^N$, the measured quantities F and B are expressed as follows,

$$F = \frac{R}{4W} \left\{ 1 + \frac{2(N+2)}{3} \frac{v}{V} + \frac{(N+1)^2}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right\}$$

$$B = \frac{R}{4W} \left\{ 1 - \frac{2(N+2)}{3} \frac{v}{V} + \frac{(N+1)^2}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right\}$$

where R is the range of a nucleus with a velocity V , and K and N are constants which can be evaluated from the range-energy table for nuclei recoiling into ^{nat}Cu . In this work the range-energy relations for each nuclide were obtained by TRIM95 (The TRansport of Ions in Matter, 1995) code developed by Ziegler¹⁹. Now R and v/V can be calculated by using above two equations and the assumptions. The calculated R is converted to the kinetic energy of residual nucleus by using this range-energy table.

The effective mean ranges FW and BW obtained in the present work at $E_0=1000$ MeV are shown by open circles as a function of the mass difference (ΔA) between products (A_p) and target ($A_t=63.6$ for natural isotopic abundance) in Fig. 1a and 1b, respectively. The FW and BW values reported by Järund *et al*¹¹ on ^{nat}Cu at $E_0=800$ MeV and Arakelyan *et al*¹² on ^{65}Cu at $E_0=4.5$ GeV are also plotted by closed squares and triangles, respectively. Their results are in good agreement with those obtained in this work, though E_0 values for each experiment are different. The FW and BW values increase with ΔA , showing the two components as indicated in the figures ; (1) the steep increase for (γ , xn) products of ^{64}Cu , ^{61}Cu , and ^{60}Cu produced by giant-resonance and/or quasi-deuteron resonance absorptions, (2) the gentle exponential increase for (γ , xnyp) products mainly by (3, 3) resonance absorption. It is, however, noted that the increase in the latter region seems to be not straight up but to change its slope around $\Delta A=15$. The forward-to-backward ratios F/B at $E_0=1000$ MeV are shown by open circles as a function of ΔA in Fig. 2. The F/B are independent of ΔA and the values range around 2-3. The weighed mean value $F/B=2.4\pm 0.1$ is apparently smaller than those from hadron-induced reactions at the same energy region, reflecting the lower momentum transfer at the initial photon absorption.

In Fig. 3 the effective mean ranges FW and BW for some representative products ^{61}Cu , ^{58}Co , ^{52g}Mn and ^{44m}Sc , that are widely separated in mass, are shown as a function of E_0 by open and closed circles, respectively. The FW and BW show E_0 -independence at $E_0\geq 600$ MeV. Shibata *et al*⁵ in our group have measured the reaction yields of 24 radioactive nuclides formed by photospallation reactions on ^{nat}Cu at $E_0=100-1000$ MeV. They analyzed the yields by the five-parameter charge distribution and mass yield distribution (CDMD) formula given by Rudstam²⁰, and found that the slope of the mass yield curve (the parameter P) approaches a constant value at $E_0\geq 600$ MeV. The E_0 -independences of the effective

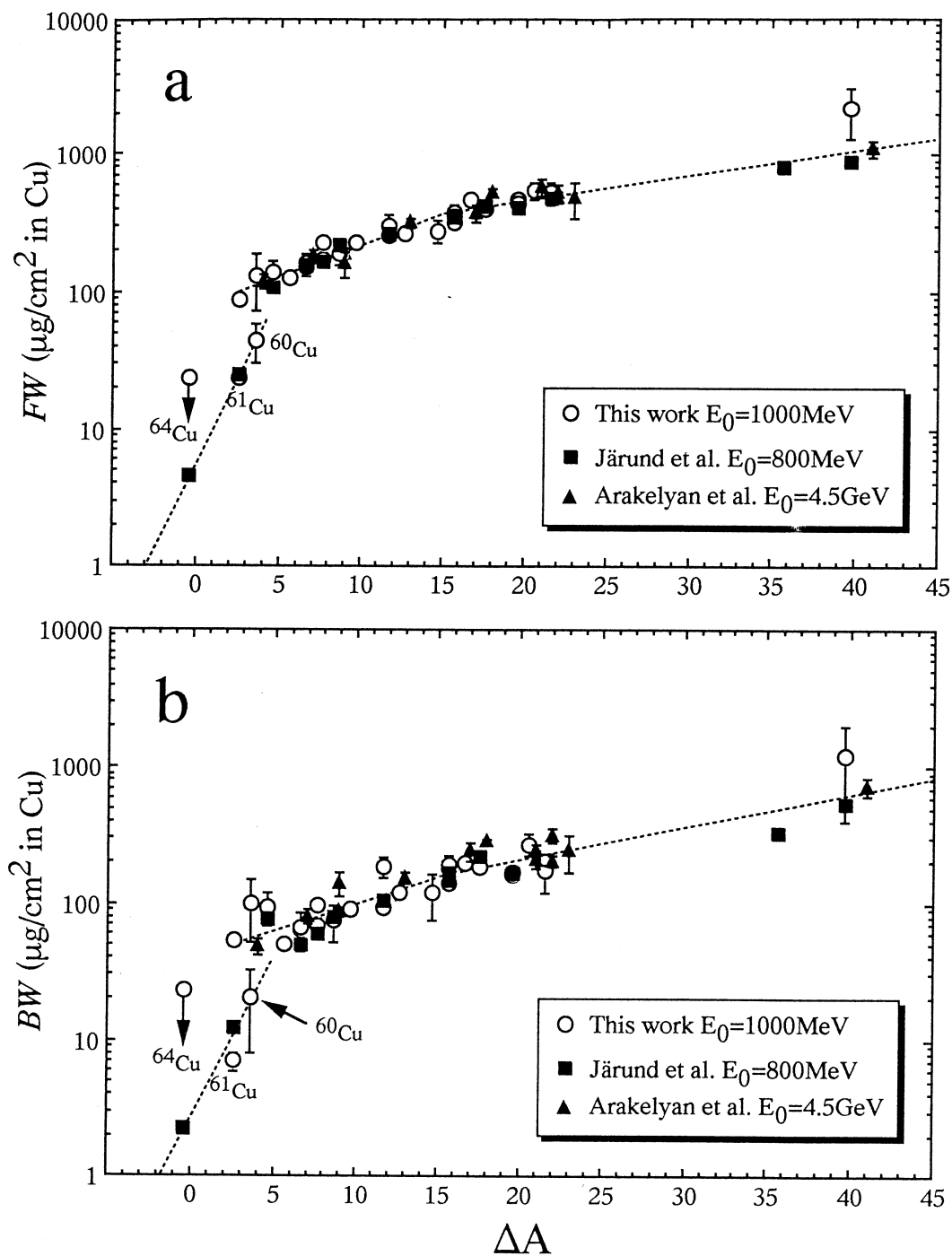


Fig. 1. The effective mean ranges FW (a) and BW (b) obtained in this work (open circles) at $E_0=1000\text{ MeV}$ as a function of the mass difference, ΔA . The closed squares and triangles are the values by Järund *et al.* on $^{\text{nat}}\text{Cu}$ at $E_0=800\text{ MeV}$ ¹¹⁾ and Arakelyan *et al.*¹²⁾ on ^{65}Cu at $E_0=4.5\text{ GeV}$, respectively.

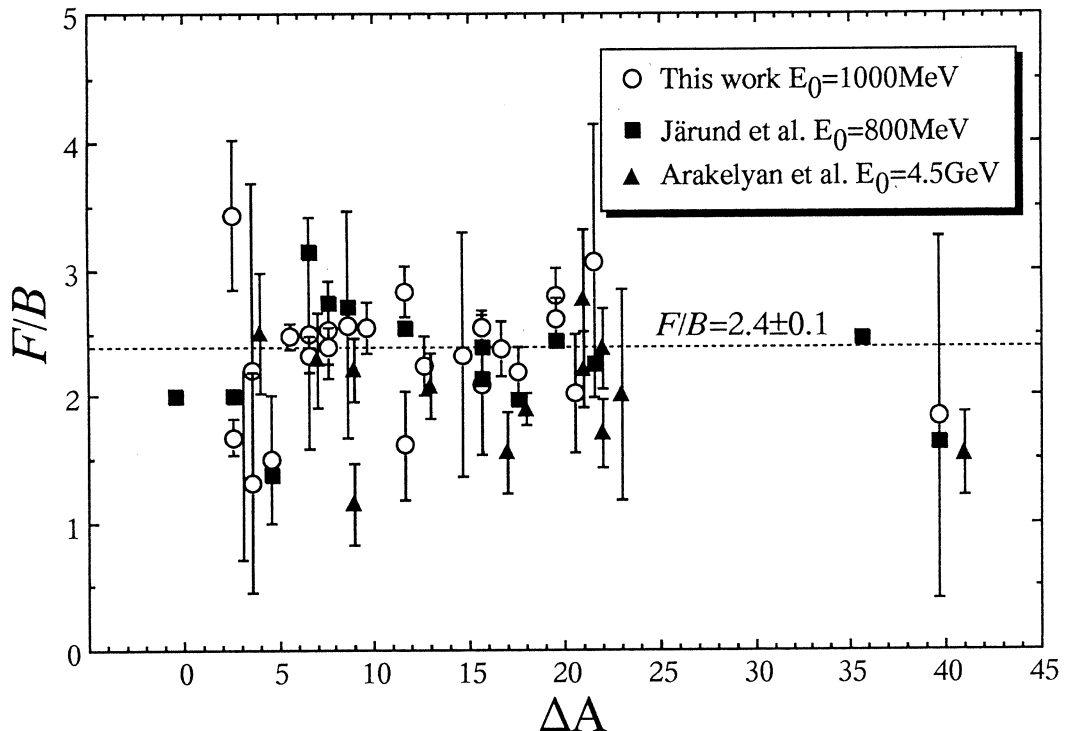


Fig. 2. The forward-to-backward ratios F/B obtained in this work (open circles) at $E_0 = 1000$ MeV as a function of the mass difference, ΔA . The closed squares and triangles are the values by Järund *et al.* on ^{nat}Cu at $E_0 = 800$ MeV¹¹⁾ and Arakelyan *et al.*¹²⁾ on ^{65}Cu at $E_0 = 4.5$ GeV, respectively.

mean ranges FW and BW , and F/B ratio obtained in this work at $E_0 \geq 600$ MeV, are consistent with the limiting behavior of P by Shibata *et al.*, and indicate that the photons responsible for the production of these nuclides are mostly of energies lower than 600 MeV, and there is no drastic change of the reaction mechanism for photospallation on ^{nat}Cu at $E_0 \geq 600$ MeV.

The kinetic energies E_R of the product nuclei obtained in this work are plotted as a function of ΔA in Fig. 4. The kinetic energies E_R reported by Järund *et al.* at $E_0 = 800$ MeV¹¹⁾ and Arakelyan *et al.* at $E_0 = 4.5$ GeV¹²⁾ are also plotted by closed squares and triangles, respectively. These results are consistent with each other within the associated error, though the different analytical method and range-energy relations were used. The E_R increase with ΔA , showing the following three components. The E_R for (γ, xn) products

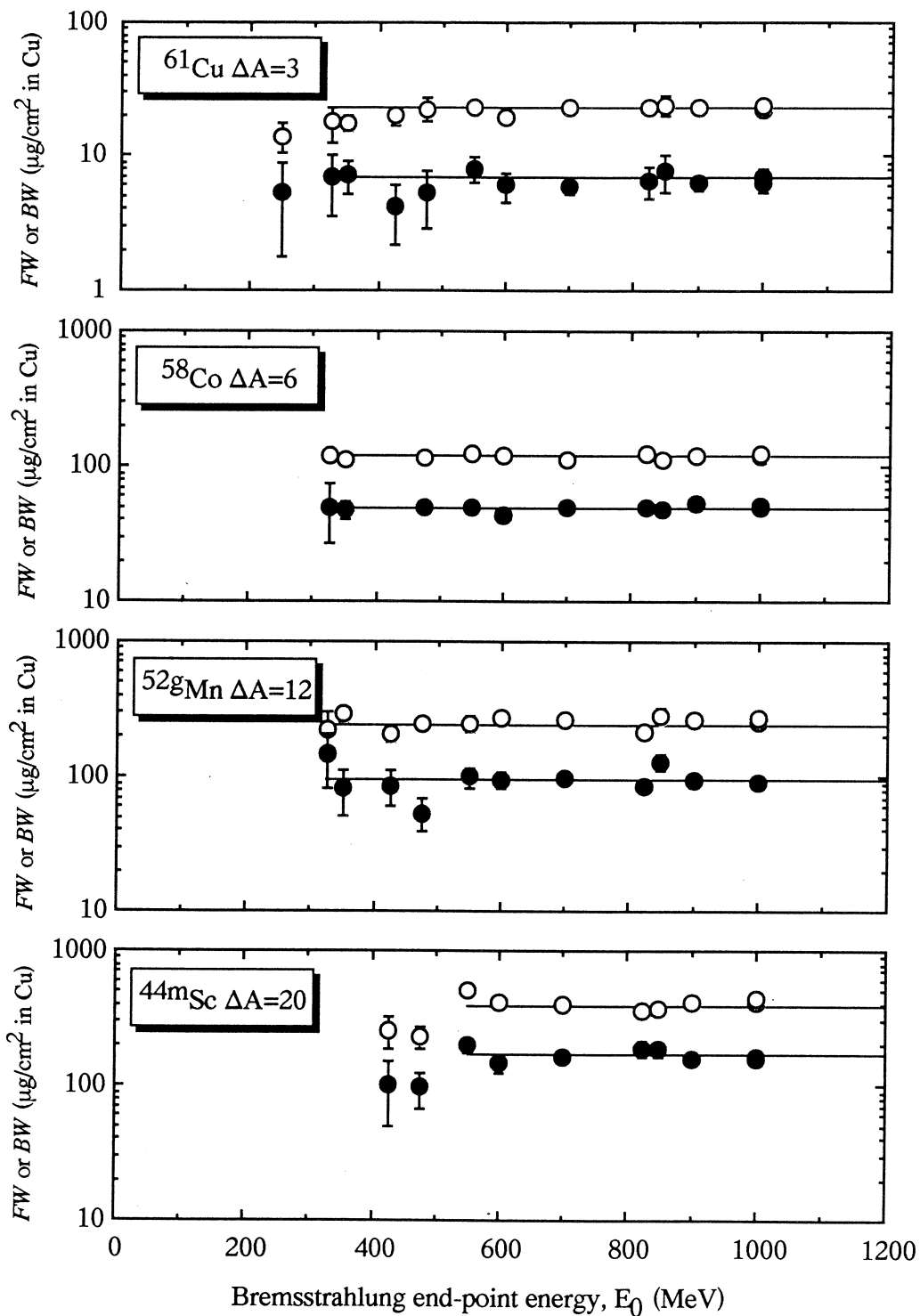


Fig. 3. The effective mean ranges FW (open circles) and BW (closed circles) obtained in this work for ^{61}Cu , ^{58}Co , ^{52g}Mn and ^{44m}Sc as a function of E_0 .

of ^{64}Cu , ^{61}Cu , and ^{60}Cu produced by giant-resonance and/or quasi-deuteron resonance absorptions are clearly smaller than those for $(\gamma, xnyp)$ products by mainly $(3, 3)$ resonance absorption. The E_R for $(\gamma, xnyp)$ products increase with ΔA linearly up to $\Delta A=13$, and the deviations from this trend is shown at $\Delta A>13$. This change at $\Delta A=13$ is consistent with that of FW and BW noted above, and may imply a change in mechanism. Note that the E_R is the kinetic energy left in the second step in the two step vector velocity model. For $\Delta A \leq 13$ the incoming photon is absorbed in the surface region of the nucleus, and the direct emissions of energetic pion and/or nucleons occur in the first step. Therefore the excitation energy left after the first step would be small. On the other hand, for $\Delta A>13$ the photon absorption occur in the deep region of the nucleus and the absorbed energy is distributed in the entire nuclear volume, and this makes the formation of lighter products

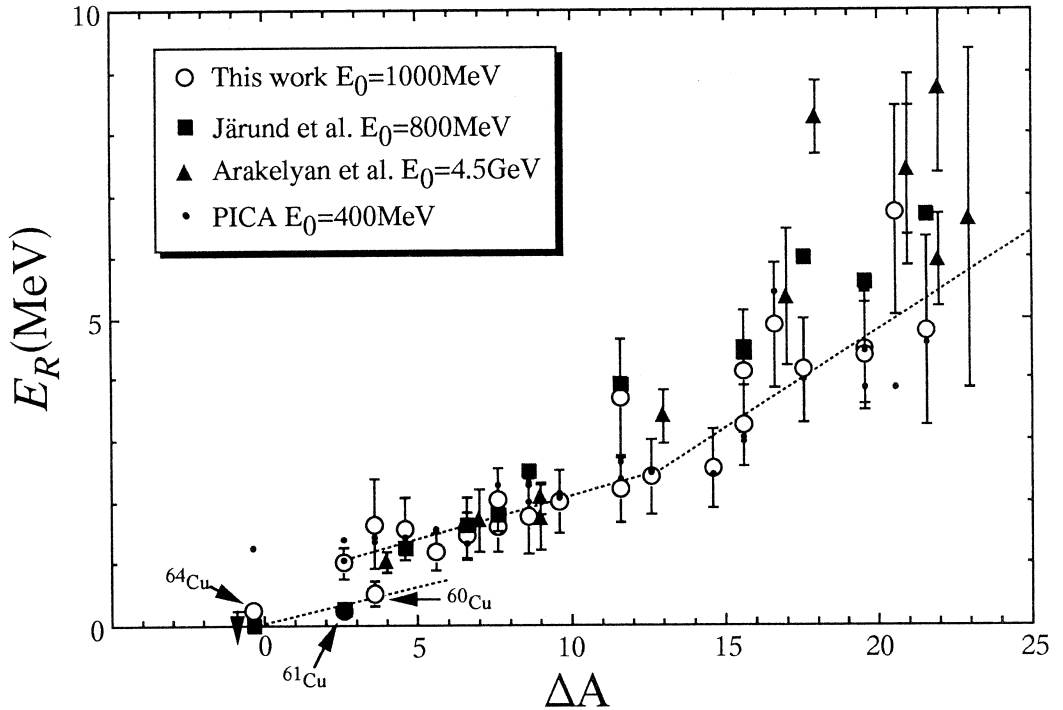


Fig. 4. The kinetic energies E_R of the observed products (open circles) on ^{nat}Cu at $E_0=1000$ MeV as a function of the mass difference, ΔA . The closed squares, closed triangles, and small closed circles are the values by Järund *et al.* on ^{nat}Cu at $E_0=800$ MeV¹¹⁾, Arakelyan *et al.*¹²⁾ on ^{65}Cu at $E_0=4.5$ GeV, and PICA code^{13, 14)} on ^{nat}Cu at $E_0=400$ MeV, respectively.

($\Delta A > 13$) possible by a multiple emission of nucleons and/or α -particles. The calculated kinetic energies for each product by PICA code by Gabriel and Alsmiller at $E_0 = 400$ MeV are plotted by small closed circles in Fig. 4. The code was constructed for the calculation for the photon energy range of $E_0 = 30-400$ MeV, because only single-pion production was considered¹⁴⁾. However, the PICA calculation at $E_0 = 400$ MeV reproduce the mean kinetic energies obtained experimentally in the limiting region of $E_0 \geq 600$ MeV, except for (γ , xn) products by giant-resonance, which is not included in PICA model.

§ 4. Summary

The recoil properties of 26 nuclides, varying from ^{24}Na to ^{64}Cu , produced in the photonuclear reactions on ^{nat}Cu at $E_0 = 250-1000$ MeV were obtained using the thick-target thick-catcher method. Kinematic properties of the product nuclei were calculated by the two-step vector velocity model. The FW and BW smoothly increase with increase of ΔA and show E_0 -independence at $E_0 \geq 600$ MeV reflecting the limiting behavior above (3, 3) resonance region. The F/B values of the all obtained nuclides are about 2-3. The calculated mean kinetic energies of spallation products on ^{nat}Cu increase with increase of ΔA , showing the three components ; (1) (γ , xn) products produced by giant-resonance and/or quasi-deuteron resonance absorptions, (2) (γ , xnyp) products by mainly (3, 3) resonance absorption initiated in the surface region of the nucleus ($\Delta A \leq 13$), (3) in the deep region of the nucleus ($\Delta A > 13$). The obtained mean kinetic energies at $E_0 \geq 600$ MeV were well reproduced by a calculation performed by PICA code at $E_0 = 400$ MeV, except for (γ , xn) products by giant-resonance. The results obtained in this work exhibited a good agreement with the previous literature values on ^{nat}Cu at $E_0 = 800$ MeV by Järund *et al.*, ^{65}Cu at $E_0 = 4.5$ GeV by Arakelyan *et al.*

The additional measurements at $E_0 \leq 250$ MeV are strongly desired, because the different photon absorptions, giant, quasi-deuteron, and (3, 3) resonance are included and the changes of the recoil properties with E_0 are expected in this energy region. As mentioned in the Introduction, the measurement at $E_0 = 65$ MeV were performed by using the 300 MeV electron linac of LNS, however, the results are preliminary at present and will be reported in a separate paper together with the previous data of $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ reaction at $E_0 =$

50 MeV by Shibata *et al*¹⁵⁾.

The recoil properties from the additional targets of ^{27}Al , $^{\text{nat}}\text{Ag}$, $^{\text{nat}}\text{Ta}$, and ^{197}Au are now being measured in our group, and the preliminary results show the same trend as $^{\text{nat}}\text{Cu}$. The radionuclides of $A_p = 1/2 - 1/3 \times A_t$ are identified in the catcher foils of $^{\text{nat}}\text{Ta}$ and ^{197}Au targets, and their recoil properties exhibit those of fission reaction, clearly distinguished from those of spallation reaction. The details will be reported elsewhere.

References

- 1) K. Sakamoto, M. Yoshida, K. Kubota, T. Fukasawa, A. Kunugise, Y. Hamajima, S. Shibata, and I. Fujiwara : Nucl. Phys. **A501** (1989) 693.
- 2) K. Sakamoto, Y. Hamajima, M. Soto, Y. Kubota, M. Yoshida, A. Kunugise, M. Masatani, S. Shibata, M. Imamura, M. Furukawa, and I. Fujiwara : Phys. Rev. **C42** (1990) 1545.
- 3) Y. Oura, A. Yazawa, M. Yoshida, S. R. Sarkar, K. Sakamoto, S. Shibata, I. Fujiwara, and M. Furukawa : Radiochim. Acta **68** (1995) 27.
- 4) K. Sakamoto, S. R. Sarkar, Y. Oura, H. Haba, H. Matsumura, Y. Miyamoto, S. Shibata, M. Furukawa, and I. Fujiwara : Phys. Rev. C (to be published).
- 5) S. Shibata, M. Imamura, T. Miyachi, M. Mutou, K. Sakamoto, Y. Hamajima, M. Soto, Y. Kubota, M. Yoshida, and I. Fujiwara : Phys. Rev. **C35** (1987) 254.
- 6) S. R. Sarkar, M. Soto, Y. Kubota, M. Yoshida, T. Fukasawa, M. Matsumoto, K. Kawaguchi, K. Sakamoto, S. Shibata, M. Furukawa, and I. Fujiwara : Radiochim. Acta **55** (1991) 113.
- 7) S. R. Sarkar, Y. Kubota, T. Fukasawa, K. Kawaguchi, K. Sakamoto, S. Shibata, and I. Fujiwara : Radiochim. Acta **55** (1991) 139.
- 8) S. R. Sarkar, Y. Oura, K. Kawaguchi, A. Yazawa, K. Sakamoto, S. Shibata, and I. Fujiwara : Radiochim. Acta **62** (1993) 7.
- 9) H. Matsumura : MS Thesis, Kanazawa University, 1997 (unpublished).
- 10) T. Fukasawa : MS Thesis, Kanazawa University, 1988 (unpublished).
- 11) A. Järund and B. Forkman : Z. Physik **A281** (1977) 47.
- 12) A. A. Arakelyan, A. R. Balabekyan, A. S. Danagulyan and A. G. Khudaverdyan :

- Nucl. Phys. **A534** (1991) 535.
- 13) T. A. Gabriel and R. G. Alsmiller, Jr. : Phys. Rev. **182** (1969) 1035.
 - 14) T. A. Gabriel, M. P. Guthrie, and O. W. Hermann : Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL-4687 (1971).
 - 15) S. Shibata, I. Fujiwara, T. Nakamura, A. Yamadera, Y. Uno, M. Hodozuka, and T. Kase : Institute for Nuclear Study, University of Tokyo Report No. 1141 (1996).
 - 16) B. Johnsson, H. Harund, and B. Forkman : Z. Phys. **A273** (1975) 97.
 - 17) K. Osada, T. Fukasawa, K. Kobayashi, Y. Hamajima, K. Sakamoto, S. Shibata, and I. Fujiwara : Res. Rept. Lab. Nucl. Sci. Tohoku Univ. **20** (1987) 299.
 - 18) L. Winsberg : Nucl. Instr. Meth. **150** (1978) 465.
 - 19) J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark : in *The Stopping and Range of Ions in Solid* (Pergamon, New York, 1985).
 - 20) G. Rudstam : Z. Naturforsch. **21a** (1966) 1027.

アクチノイド核種の高感度測定法に関する実験研究(1) 弗化サマリウム共沈法の検討

金研材料試験炉利用施設

三頭聰明・原 光雄・鈴木吉光
渡部 信

従来の超ウラン元素 (TRU 元素) の溶液化学的研究成果は, ウラン, ネプツニウム, プルトニウム等の長半減期核種を使用して高い濃度の溶液化学実験によって蓄積されたものである。それに対して高レベル放射性廃棄物処分におけるニアフィールドでの TRU 元素の移行挙動は, 中性付近の 10^{-10} M 以下の極低濃度の錯形成, 酸化還元反応およびそれらに影響された吸脱着分配平衡により支配される。これらの反応と平衡を検証するためには, 極低濃度の TRU 元素についての信頼できる分析定量法が不可欠の実験手法となる。

我々は TRU 元素が弗化ランタニドと定量的に共沈することに着目し^{1, 2)}, 天然のアルファ一放射体の ^{147}Sm を内部標準として TRU 元素を弗化サマリウムに共沈させた沈殿試料で直接アルファスペクトルを測定する定量法について検討した。

§ 1. 弗化サマリウム共沈条件と α 線スペクトル測定に関する検討

弗化ランタン共沈法は, アクチノイドの III・IV 値の選択的捕集法として広く用いられているが, ランタンだけでなくその他の希土類元素も共沈担体として利用できる。一方, 希土類には, 第1表のような長半減期の同位体が存在する。このうちサマリウムは, 比放射能が大きく, その α 線のエネルギーがアクチノイド核種の α 線エネルギーと大きく異なっているので, ^{147}Sm を α 線測定の内標準として, 検出器の計数効率とエネルギーの校正を必要としない定量法が可能になると考えられる。

そのような測定法を実証するには, 先ず,

- ①弗化サマリウム沈殿を直接 α 線測定試料とする方法, 特にサマリウム担体量とエネルギー分解能との関係
- ②アクチノイド元素の定量的な共沈条件, 特にサマリウム担体の量の2点について検討し, 定量的な共沈に必要な十分なサマリウムを使用しても, エネルギー分解能のよい α 線スペクトルが測定可能なことを確かめる必要がある。

第1表 長半減期希土類同位体。

核種	存在比 %	半減期 (年)	比放射能 (Bq/mg)	放出放射線
^{138}La	0.089	1.35×10^{10}	0.00063	β^- , γ 789, 1436KeV
^{144}Nd	23.87	2.1×10^{15}	0.00001	α 1.83MeV
^{147}Sm	15.07	1.06×10^{11}	0.13	α 2.23MeV
^{148}Sm	11.3	7×10^{15}	0.0000015	α 1.56MeV
^{152}Gd	0.20	1.1×10^{14}	0.0000016	α 2.1MeV
^{176}Lu	2.60	3.62×10^{10}	0.054	β^- , γ 88,202,307KeV

1.1 弗化サマリウム沈殿条件と α 線測定試料作製法

市販されている各種のフィルターを用いて ^{147}Sm の α 線を測定することを試みた結果、弗化サマリウム沈殿を孔径 $0.22\mu\text{m}$ 、直径47mmのスクリーンタイプのフィルター(Fujiマイクロフィルター、またはNuclipore filter)上に吸引濾過して捕集し、両面粘着テープを用いて適当な大きさのバックングに張り付けて真空乾燥した試料で ^{147}Sm の α 線が測定できることを確認した。測定試料を加熱乾燥すると、フィルターが変形しアルファースペクトルが得られない。

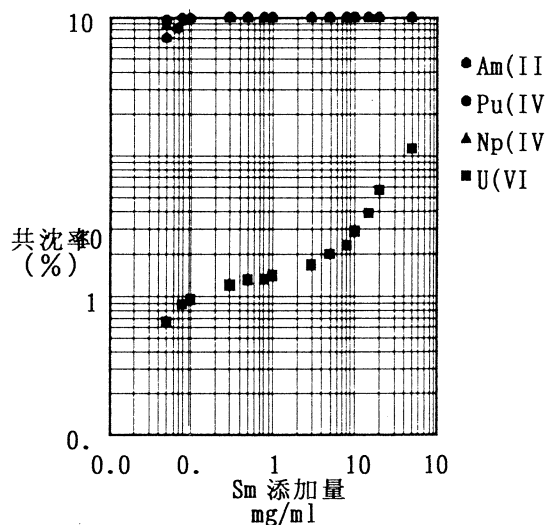
第2表 サマリウム沈殿膜厚とエネルギー分解能。

膜厚 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	FWHM KeV
25	40~60
50	50~70
100	50~80
150	80~140
200	~500

結果を第2表に示す。約 $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚さまでは、分解能の有意な劣化なく α 線スペクトル測定が可能である。上記の大きさのフィルターを使用するとして、サマリウム担体使用量は、1.7mg以下とする必要がある。

第1表には、サマリウム担体添加量といくつかのアクチノイド元素の共沈率の関係を示した。

次に、サマリウム量とエネルギー分解能の関係を、 900mm^2 のSi検出器(FWHM 35KeV)を用いて検討した。



第1図 サマリウム担体添加量とアクチノイドの共沈率。

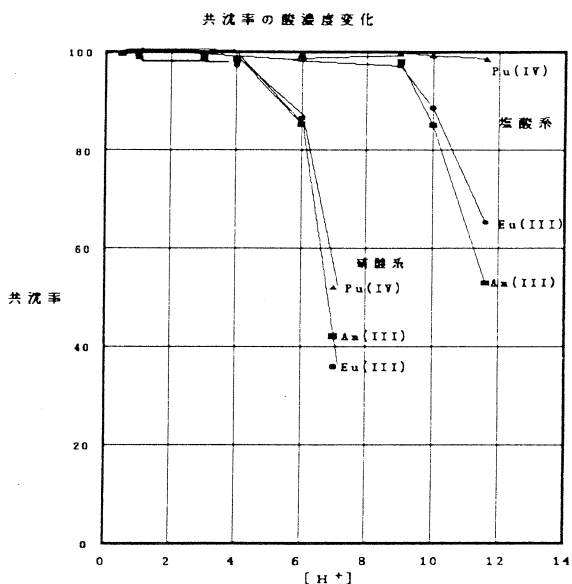
共沈するのはⅢ・Ⅳ価のアクチニドで、Ⅵ価のウラニルは多量のサマリウムを用いない限り共沈しない。このことを利用して、アクチニドの酸化数を弁別できる可能性がある。酸化数弁別はサマリウム添加量0.05～5 mg/ml の範囲で可能と考えられるが、上記の分解能への影響を考慮して、試料溶液量20～30ml に1 mg のサマリウムを添加するという共沈条件を決定した。

1.2 酸濃度の影響

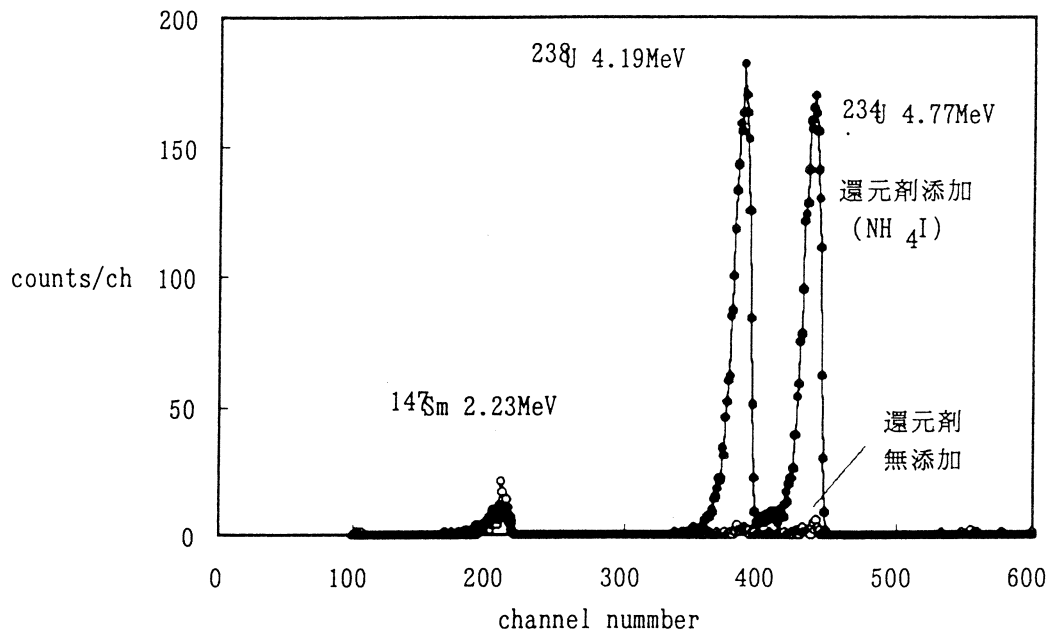
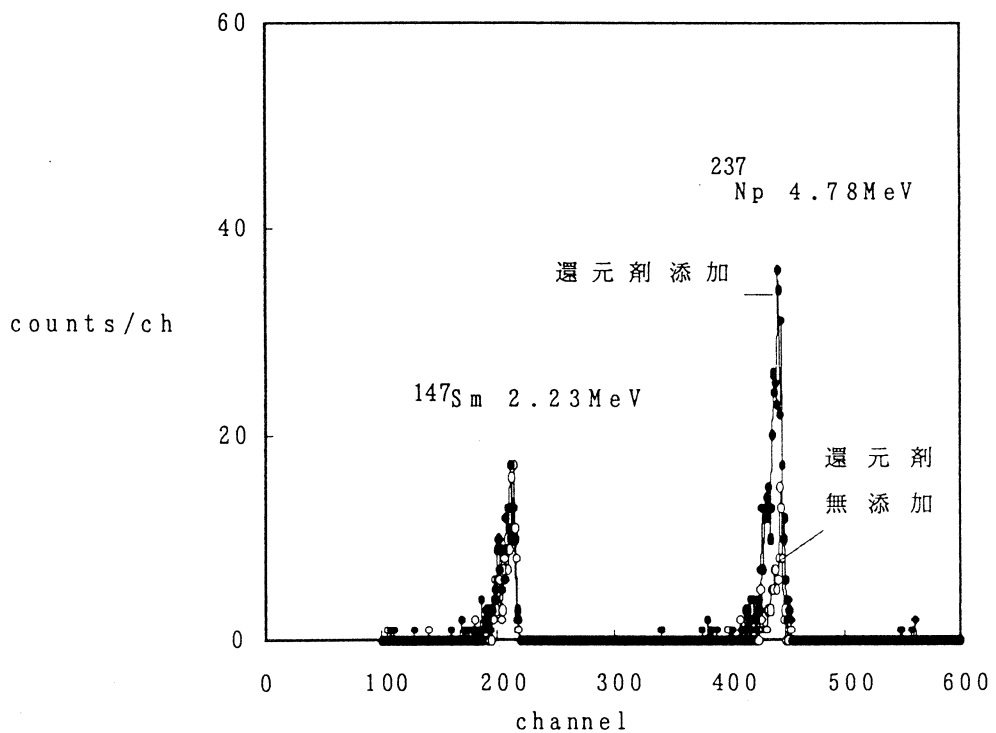
共沈率と酸濃度との関係を、硝酸と塩酸について検討した。その結果を第2図に示す。硝酸では4 M 以上、塩酸では9 M 以上の濃度で急激に共沈率が低下する。定量的な共沈が可能な酸濃度として、1 M から4 M の間が選択できる。

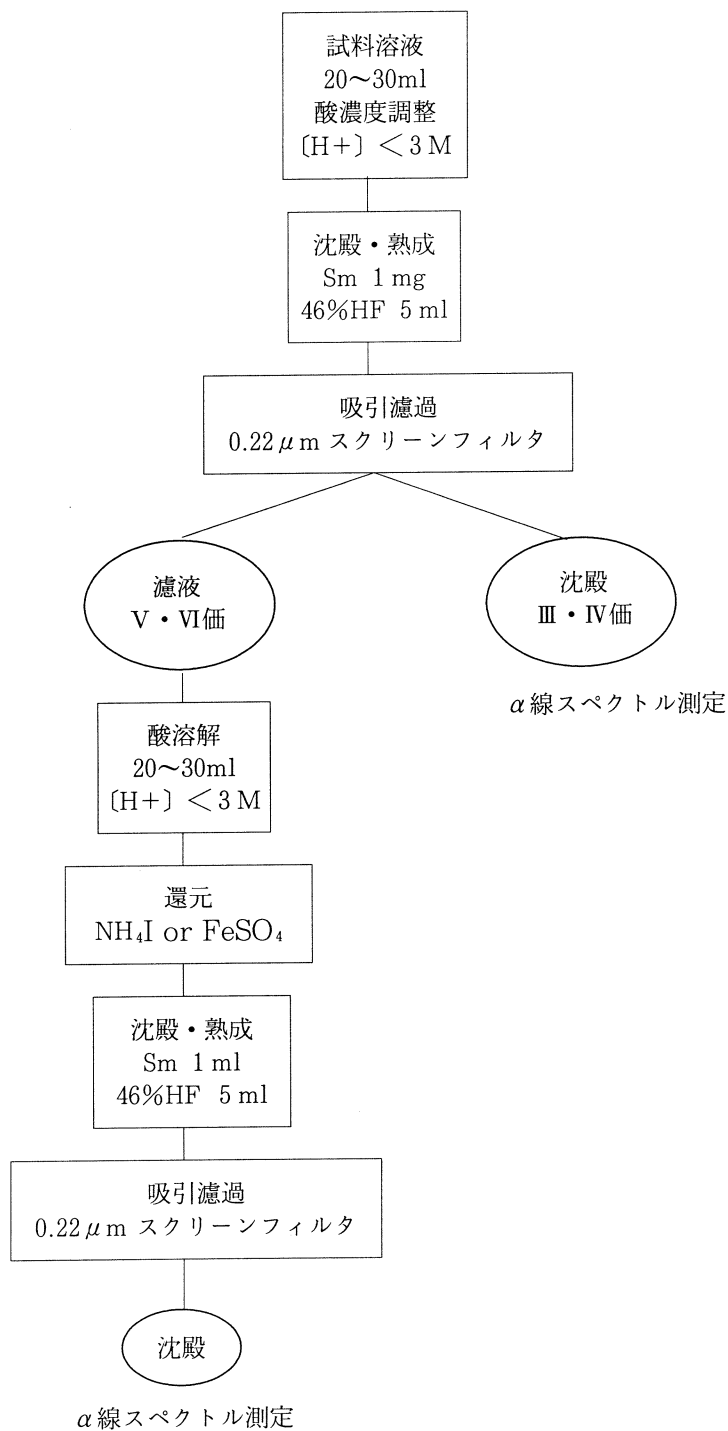
§ 2. ウラン・ネプツニウムの還元条件

天然ウラン1 mg/ml の希硝酸溶液と8 Bq/ml の²³⁷Np の塩酸溶液を用いて、上記の共沈・測定法の検証を行った。試料として用いた溶液中のウランはⅥ価であると推定できるが、ネプツニウムはⅣ価とⅤ価の混合溶液である。そこで、還元剤として Fe^{2+} と NH_4I をとりあげ、その添加の効果を検討した。結果を、第3、4図に示す。ウラン・ネプツニウム共に還元剤を加えると、定量的に共沈する。還元剤が存在しない時のウランの共沈率は2%以下であり、ネプツニウムでは、約20%であった。



第2図 共沈率の酸濃度による変化。

第3図 $\text{SmF}_3\text{-U}$ の α 線スペクトル。第4図 $\text{SmF}_3\text{-Np}$ 沈殿の α 線スペクトル。



第5図 低濃度アクチノイド酸化数弁別測定法。

この違いは、原試料溶液中の酸化数の分布を反映したものと推定できる。還元剤として用いた FeSO_4 と NH_4I には有意な差は認められなかった。今回プルトニウムについて検討を行ってはいないが、二つの還元剤はいずれもプルトニウム還元に有効であることが知られている。

§ 3. 酸化数弁別測定法の概要

上記の知見より、アクチニドのⅢ、Ⅳ価とⅤ、Ⅵ価を弁別する酸化数弁別定量法として、第5図のようなフローシートを組むことができる。今後は、プルトニウム（核理研共同利用で ^{237}Np の制動放射照射で ^{236}Pu を製造する）についても同様の検討を行い、定量限界と酸化数弁別の可能性等について検討する。

参 考 文 献

- 1) M. Hara and S. Suzuki : Bull. Chem. Soc. Jpn. 48 (1975) 1431.
- 2) L. J. Slee, G. Philips and E. N. Jenkins : Analyst 84 (1959) 596.

Diffusion of Magnesium in Al-Mg-Si Alloys

S.-I. Fujikawa

*Department of Materials Science, Faculty of Engineering,
Tohoku University, Sendai 980-77, Japan*

The tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in the region of α solid solution of the pseudo-binary Al-0.97, 1.15 and 1.44 at. % Mg_2Si alloys were determined using the residual activity method. Carrier-free radioactive tracer ^{28}Mg was prepared by myself using the photo-nuclear reaction, $^{30}\text{Si}(\gamma, 2p)^{28}\text{Mg}$. The tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in the Al-Mg₂Si alloys are found to be larger than self-diffusivities of Al and somewhat smaller than the impurity-diffusion coefficients of Mg in aluminum. Moreover, the dependence of the tracer diffusion coefficients on Mg₂Si content was not observed.

§ 1. Introduction

Al-Mg-Si alloys is one of most important commercial Al alloys used widely. Therefore, the diffusion data of Mg and Si in the alloys are necessary to control the various heat treatments such as homogenization treatment, quenching treatment and aging treatment of the alloys. However, no data have been yet reported because of no radioactive tracer in Si adequate for diffusion experiment and generally unavailable radioactive tracer ^{28}Mg ($t_{1/2}=7.54\times 10^4\text{s}$). As shown in Fig.1, Al-Mg-Si system forms the pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys¹⁾. In the present work, the tracer diffusion coefficients of Mg in the alloys were determined using the tracer ^{28}Mg .

§ 2. Experimental procedures

2.1 The preparation of carrier-free ^{28}Mg

The 99.9999mass% purity silicon wafers for semiconductor industry was used as the target and was sealed in a quartz tube of 10mm in diameter. All the other chemicals used were of an "extrremely pure" grade. Bremsstrahlung irradiation was carried out at an

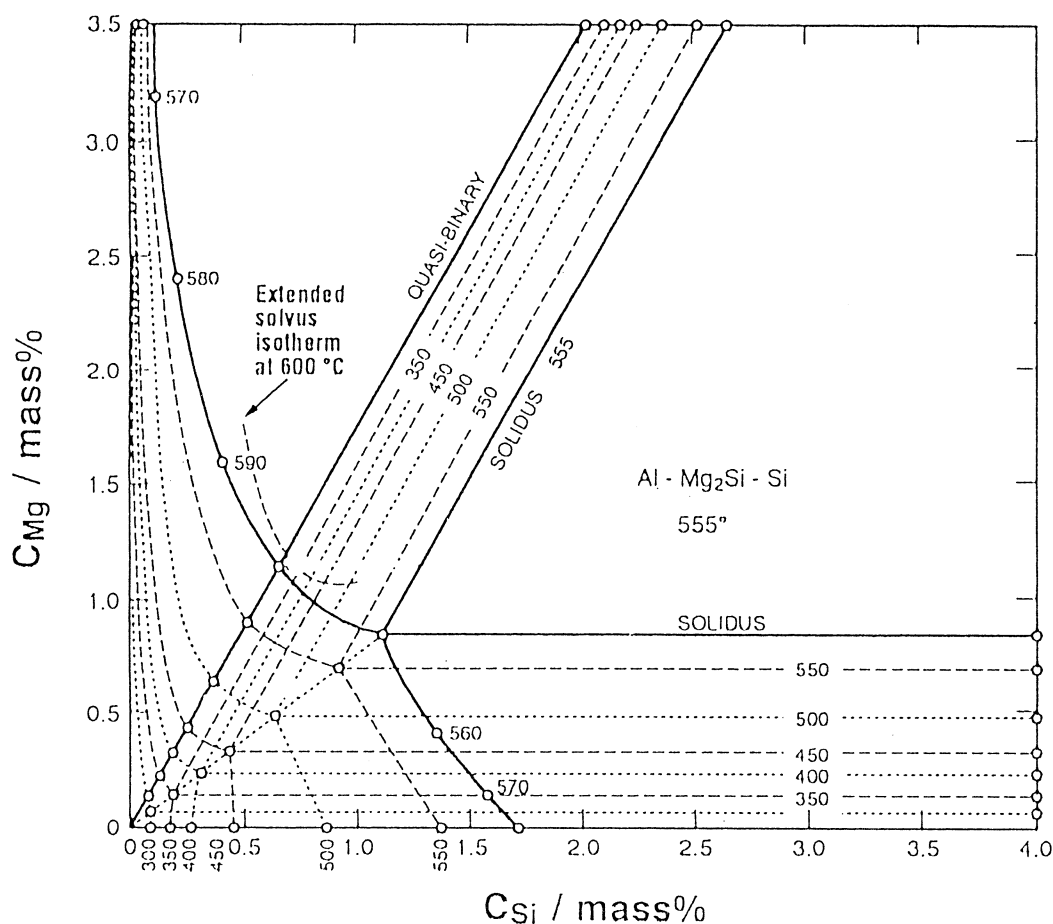


Fig. 1. Solid solubility limit of Mg and Si in Al-Ma-Si alloys as given by Phillips.

electron energy of 60MeV for 8.64×10^4 s by 300MeV linear electron accelerator of Tohoku University. The sample tube was placed horizontally on the axis of the electron beam in close contact with the back of a Pt converter mm thick and cooled by running tap water. The chemical separation procedure for carrier-free ^{28}Mg is shown Fig. 2. The typical elution curve of carrier-free ^{28}Mg and ^{24}Na from the Dowex 50W X 8 column is shown in Fig. 3. Then the radioactivity was measured with a well-type scintillation counter. As can be seen in Fig. 4, the separation of both carrier-free radioisotopes was satisfactory. The radiochemical purity of ^{28}Mg was ascertained by measuring the γ -ray spectrum with Ge(Li) detector connected with multichannel pulse-height analyzer. The result is shown in Fig. 4.

2.2 Diffusion experiment

The Al-Mg-Si alloys were prepared 99.99 mass% Al, 99.9mass% Mg and 99.999mass % Si using a high-frequency induction furnace and cast into an iron mould. The ingots were finally machined into cylinder type specimens with 13mm in diameter and 13mm in height. The chemical composition and density are in Table 1. The densities were determined by measuring the weight and volume. The specimens were annealed at 773K for 1.3×10^6 s in order to homogenize the composition and for grain growth. The resultant grain size of the specimens was about 3 mm. One face of each specimen was ground carefully with Si carbide paper. To remove the Al oxide layer, the specimens were electropolished in a solution of ethyl alcohol and perchloric acid. ^{28}Mg in the form of chloride was dried on

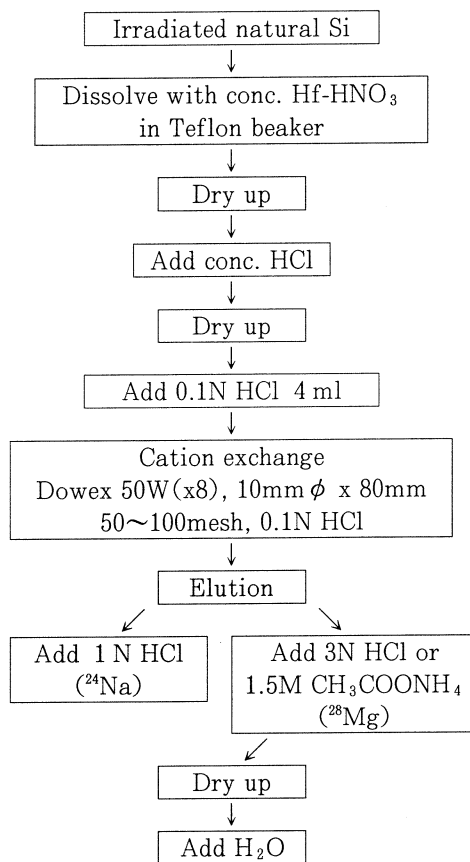


Fig. 2. Flow chart of production process of carrier-free ^{28}Mg from irradiated Si.

the flat surface of the specimens. The metallic tracer was produced by the reaction of the chloride with aluminum in the very early stage of diffusion annealing. The specimens were then annealed in a silica tube containing about 27kPa of purified helium 293K and a small amount of Mg chips to avoid evaporation of ^{28}Mg . The diffusion annealing was carried out at α -phase region, according to the phase diagram in Fig. 1. As the life-time of ^{28}Mg is very short, the diffusion time is limited. After the diffusion anneal, the cylindrical surface and the bottom of the specimens were reduced by a depth of about 1mm using a precision lathe. This procedure eliminated the possible effects of surface diffusion and evaporation of ^{28}Mg from the deposited layer. Each specimen was analyzed by the residual activity technique whereby thin layers from the specimen surface were removed successively

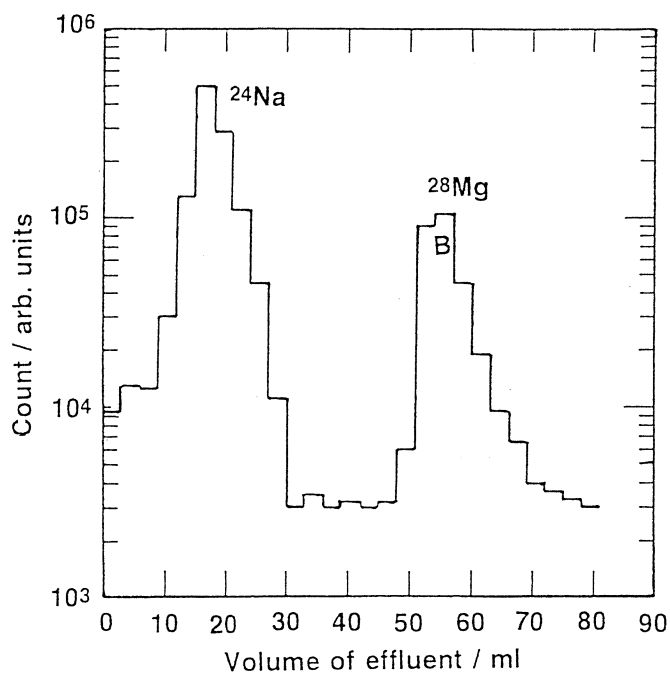


Fig. 3 . Elution curve of carrier-free ^{28}Mg and ^{24}Na from Dowex 50W x 8 column.

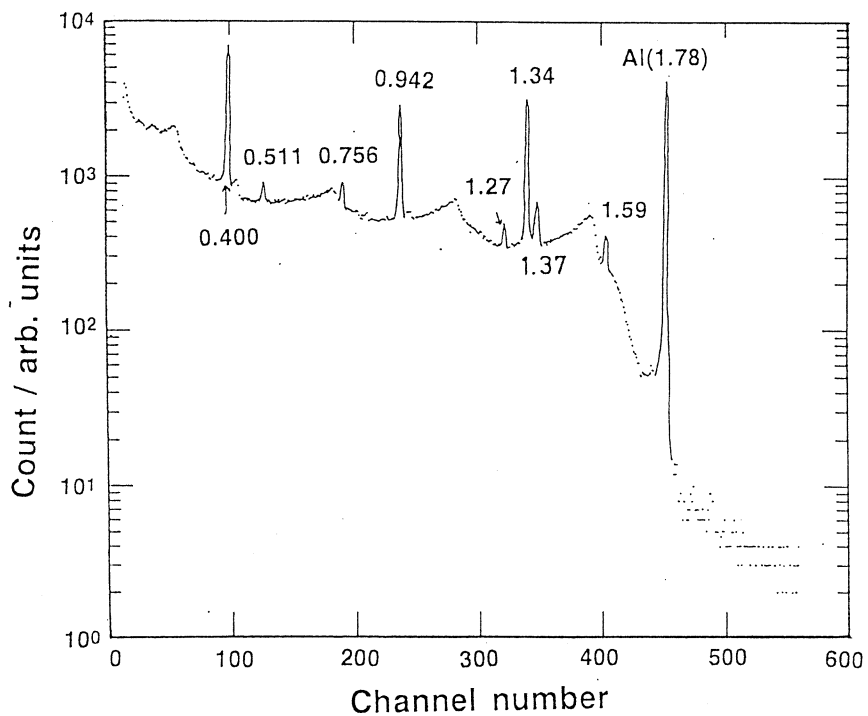


Fig. 4 . γ -ray spectrum of ^{28}Mg , corresponding to B in Fig. 3 .

Table 1. Chemical composition and density of pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys.

specimen	Mg(mass%)	Si(mass%)	Mg ₂ Si(at. %)	density(g cm ⁻³)
Alloy 1	0.58	0.34	0.97	2.69
Alloy 2	0.70	0.40	1.15	2.68
Alloy 3	0.89	0.50	1.44	2.68

by grinding parallel to the flat surface with Si carbide paper. To count the total residual activity of the bulk of the specimens after each grinding, a well-type NaI (Tl) scintillation counter and 400-channel pulse-height analyzer were used. The channel width of the latter was adjusted to count the γ -radiation of 0.942 and 1.34 MeV energies. The thickness of each section removed was measured by the weight-loss method using a microbalance.

§ 3. Results and discussion

The solution of Fick's second equation for a very thin radioactive layer at the end of a sufficiently long rod, analyzed by the residual-activity technique is given by

$$\begin{aligned} \mu I_n - dI_n/dX_n &= k_1 \cdot C(X_n) \\ &= k_2 \cdot \exp(-X_n^2/4D^T \cdot t), \end{aligned} \quad (1)$$

where μ is the linear absorption coefficient of the γ -radiation of ²⁸Mg in Al-Mg-Si alloys in m⁻¹, I_n is the bulk activity in counts per unit time after a layer of thickness X_n is removed, k_1 and k_2 are constants. $C(X_n)$ is the radioactive concentration at a distance X_n from the original surface. D^T is the diffusivity in m²s⁻¹, and t is the diffusion time in seconds. The value of μ for the energy of the γ -radiation used in the present work was calculated using the values of μ for pure metals²⁾ and the composition of the Al-Mg-Si alloys. It is found that the term of μI_n in the present work is negligibly small, in comparison with the term of $(-dI_n/dX_n)$. Consequently, the diffusion coefficients were determined from the plots of $\text{Log}(-dI_n/dX_n)$ vs. X_n^2 by eq. (1). Fig. 5 and Fig. 6 show the typical plots of I_n vs. X_n . Fig. 7 and Fig. 8 show the typical plots of $\text{Log}(-dI_n/dX_n)$ vs. X_n^2 for each composition. Table 2 shows the diffusion coefficients of ²⁸Mg in the pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys for different temperatures. The dependence of the tracer diffusion coefficients on Mg₂Si content has not been observed. Fig. 9 shows the temperature

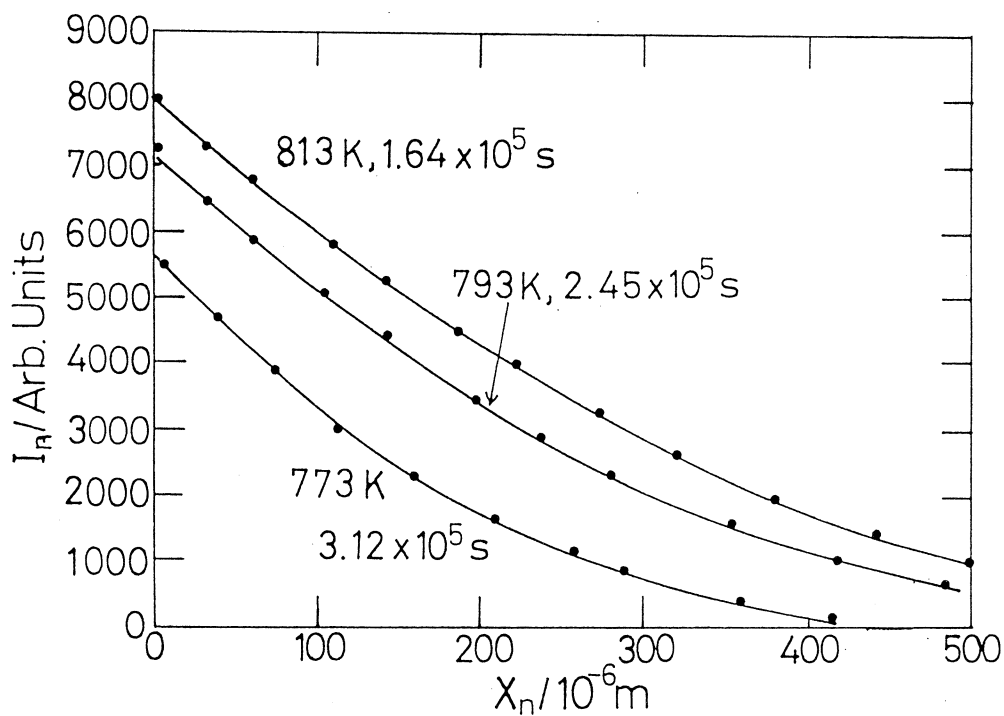


Fig. 5. I_n vs. X_n plots for the diffusion of ^{28}Mg in Al-0.97 at.% Mg_2Si alloys.

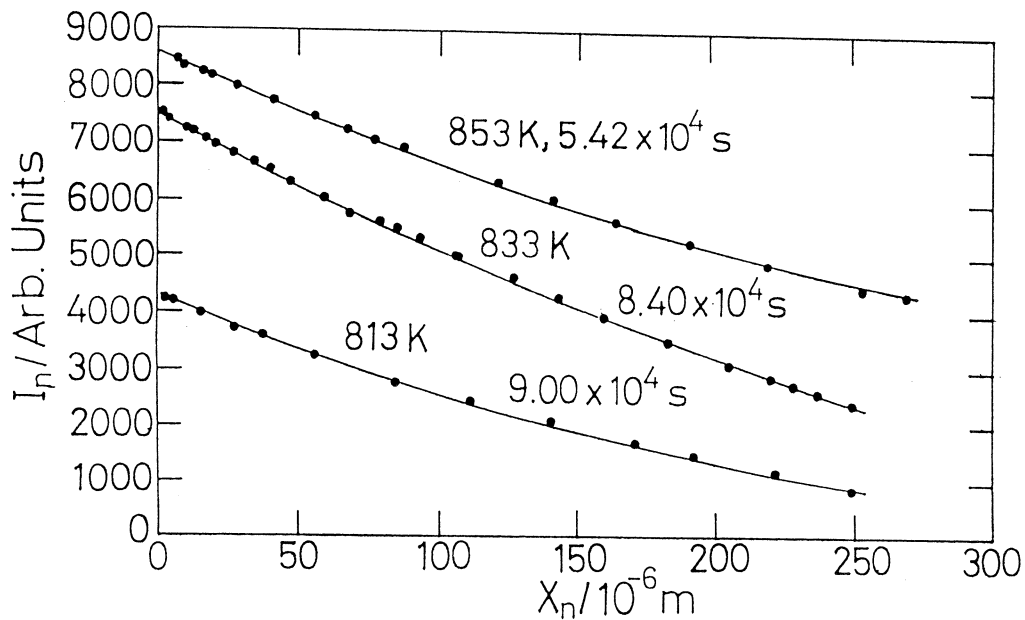


Fig. 6. I_n vs. X_n plots for the diffusion of ^{28}Mg in Al-1.44 at.% Mg_2Si alloys.

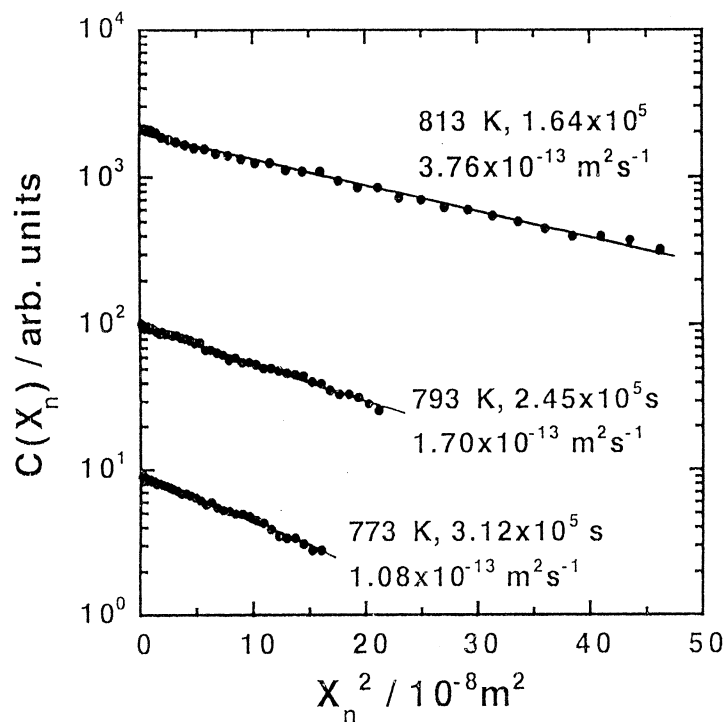


Fig. 7. $\text{Log}(-dI_n/dX_n)$ vs. X_n^2 plots for diffusion of ^{28}Mg in Al-0.97at.% Mg_2Si alloy.

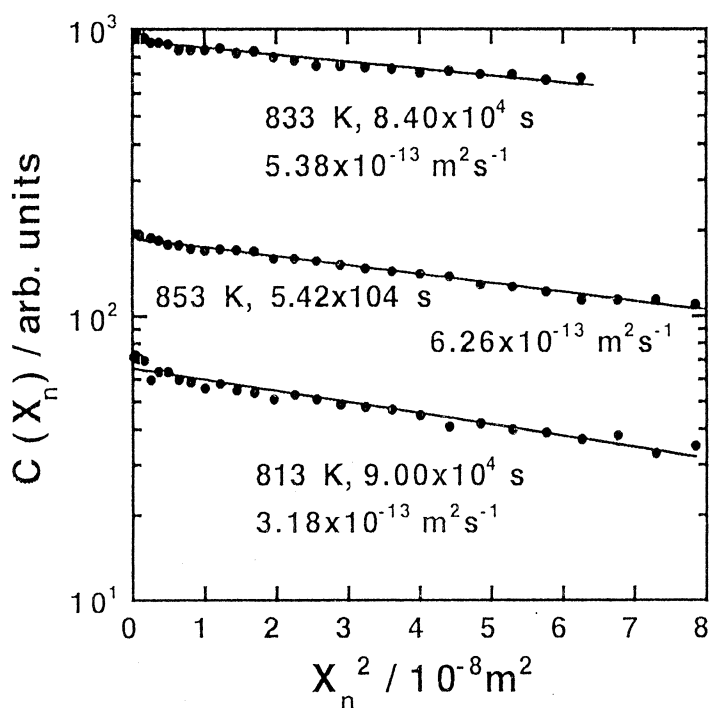


Fig. 8. $\text{Log}(-dI_n/dX_n)$ vs. X_n^2 plots for diffusion of ^{28}Mg in Al-1.44at.% Mg_2Si alloy.

Table 2. Tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys.

temperature(K)	Alloy 1	Alloy 2	Alloy 3
773	1.08x10 ⁻¹³ # (3.12x10 ⁵) *	1.11x10 ⁻¹³ # (3.43x10 ⁵) *	
773		1.25x10 ⁻¹³ # (3.43x10 ⁵) *	
793	1.70x10 ⁻¹³ # (2.45x10 ⁵) *	1.80x10 ⁻¹³ # (2.44x10 ⁵) *	
793	1.81x10 ⁻¹³ # (2.45x10 ⁵) *		
813	4.02x10 ⁻¹³ # (1.64x10 ⁵) *		3.18x10 ⁻¹³ # (9.00x10 ⁴) *
813	3.75x10 ⁻¹³ # (1.64x10 ⁵) *		
833	4.90x10 ⁻¹³ # (8.72x10 ⁴) *	5.62x10 ⁻¹³ # (1.59x10 ⁵) *	5.38x10 ⁻¹³ # (8.40x10 ⁴) *
838		4.95x10 ⁻¹³ # (1.59x10 ⁵) *	
853	8.19x10 ⁻¹³ # (6.86x10 ⁴) *		6.26x10 ⁻¹³ # (5.42x10 ⁴) *

: diffusion coefficient(m²s⁻¹) ; * : diffusion time (s)

dependence of tracer diffusion coefficients for ^{28}Mg in the pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys, in comparison with the impurity diffusion coefficients of Mg in aluminum by other workers³⁻⁶). The tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in the pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys are larger than self-diffusivities of Al and somewhat smaller than the impurity-diffusion coefficients of Mg in pure aluminum. Table 3 shows the Arrhenius parameters obtained in the present work, compared with the other works shown in Fig. 9. The values of D_0 and Q in the present work are nearly equal to those for the impurity diffusion of Mg in aluminum.

§4. Conclusion

The tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in the region of α solid solution of the pseudo-binary Al-0.97, 1.15 and 1.44 at% Mg₂Si alloys were determined using the residual activity method. The tracer diffusion coefficients of ^{28}Mg in the pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys are found to be larger than self-diffusivities of Al and somewhat smaller than the impurity-

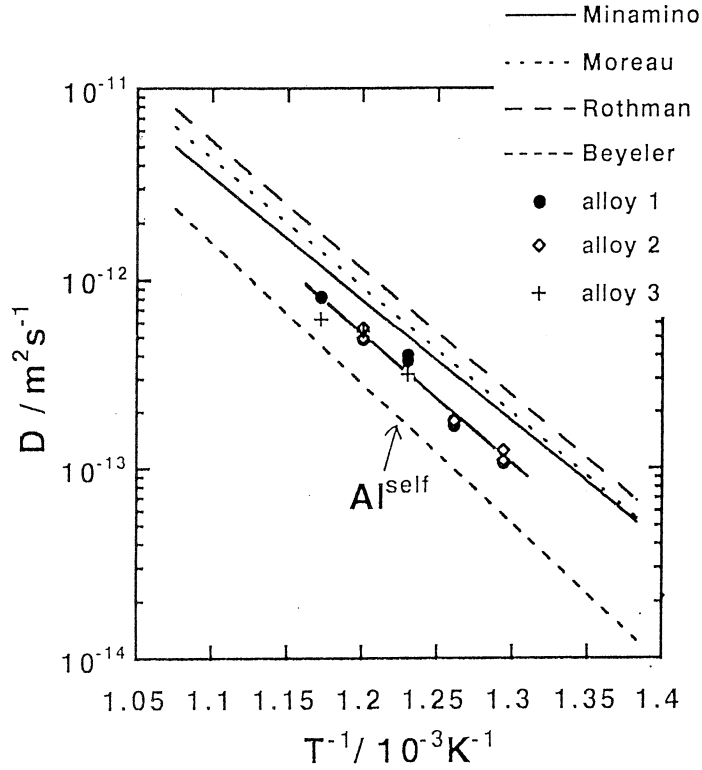


Fig. 9. Temperature dependence of ^{28}Mg in pseudo-binary Al-Mg₂Si alloys, in comparison with those for the impurity diffusion of Mg in aluminum.

Table 3. Arrhenius parameters for diffusion of Mg in pseudo-binary Al-Mg₂Si alloy and aluminum.

diffuser	matrix	$D_0(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$Q(\text{kJ mol}^{-1})$	worker
^{28}Mg	Al-Mg ₂ Si	1.06×10^{-4}	133	present work
Mg	Al	4.2×10^{-5}	125	Ref. 5
Mg	Al	1×10^{-4}	130	Ref. 4
^{28}Mg	Al	1.24×10^{-4}	130	Ref. 3
^{26}Al	Al	2.25×10^{-4}	144	Ref. 6

diffusion coefficients of Mg in pure aluminum. Moreover, the dependence of the tracer diffusion coefficients on Mg₂Si content was not observed.

Acknowledgment

The author is grateful to members of the Linac machine group and radioisotope group at the Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, for the irradiation facilities.

References

- 1) H. W. L. Phillips: Annotated Equilibrium Diagrams of Some Aluminum Alloy System, The Institute of Metals, London **65** (1959).
- 2) A. L. Conner, H. F. Atwater and E. H. Plassmann: Phys. Rev. A, **1** (1970) 539.
- 3) S. J. Rothman, N. L. Peterson, L. J. Nowicki and L. C. Robinson: Phys. Stat. Sol.(b) **63** (1974) K29.
- 4) G. Moreau, J. A. Cornet and D. Calais: J. Nucl. Mater **38** (1971) 197.
- 5) Y. Minamino *et al.*: J. Mat Sci. **18** (1983) 2677.
- 6) M Beyeler and Y. Adda: J. Phys. (Paris) **29** (1968) 345.

Diffusion of Scandium in Aluminum

S.-I. Fujikawa

*Department of Materials Science, Faculty of Engineering,
Tohoku University, Sendai 980-77, Japan*

The impurity diffusion coefficients of Sc in aluminum single crystals between 813 K and 928 K were determined using serial-sectioning method and $^{44m}\text{Sc}(t^{1/2}=2.11\times 10^5\text{ s})$ prepared by a photonuclear reaction. The temperature dependence of the impurity diffusivities is expressed by: $D=5.31\times 10^{-4}\exp(-173\text{ kJ mol}^{-1}/RT)\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$. The results are compared with those of other transition elements in aluminum.

§1. Introduction

It is very important to study the impurity diffusion in aluminum because such an investigation gives fundamental information to clarify the various phenomena and properties of Al alloys. Impurity diffusion of transition elements in aluminum has called the attention of many researchers since the transition elements are anomalous diffusers characterized by high activation energies, high pre-exponential factors and a wide range variation of the diffusivities compared with self-diffusion in aluminum. The theoretical interpretation of these results has not been clear at present. Furthermore, it is difficult to obtain reliable data of impurity-diffusion for transition elements in aluminum because of the hold up phenomena of the tracers near the surface of specimens. Scandium is the first element of the transition elements in the periodic table and classified as one of rare earth elements owing to the similarities of chemical properties. From this point of view it is very interesting to investigate the impurity diffusion of Sc in aluminum, in comparison with those of other transition elements. Reliable impurity diffusion data of Sc in aluminum have not yet been obtained. Moreover, recently it has been noted that scandium, whose maximum solid solubility in aluminum is 0.21 at. %¹⁾, produces an excellent age-hardening effect in Al-Sc alloys²⁾. The use of Sc as additional element introduces superplastic behavior, a high

strength level with higher ductility and high heat-resistant property in other Al alloys and effective in suppressing electromigration in aluminum. Moreover, the kinetics of precipitation in Al-Sc alloys has attracted much interest²⁾. Therefore, it is desired to investigate the impurity diffusion of Sc in aluminum to clarify such a behaviour of Sc in aluminum and Al alloys. In the present work, the impurity-diffusion coefficients of Sc in aluminum were determined using ^{44m}Sc ($t^{1/2}=2.11\times 10^6\text{ s}$) with the high-specific activity.

§ 2. Experimental procedure

2. 1 Preparation of radioactive tracer ^{44m}Sc

Natural Sc metal with a purity of more than 99.9 mass % was used as a target for the preparation of ^{44m}Sc . Bremsstrahlung irradiation was carried out by means of the 300 MeV linear accelerator(Linac) of Tohoku University. The Linac was operated typically in the condition of 30 MeV for $7.2\times 10^4\text{ s}$. The sample tube was placed horizontally on the axis of electron beam in close contact with the back of a Pt converter of 2 mm in thickness cooled by running tap water. The ^{44m}Sc was prepared using the photonuclear reaction $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44m}\text{Sc}$. The irradiated Sc metal was dissolved using conc. chloric acid and made into the Sc chloride by dry up. Fig. 1 shows γ -ray spectrum of ^{44m}Sc obtained by this method.

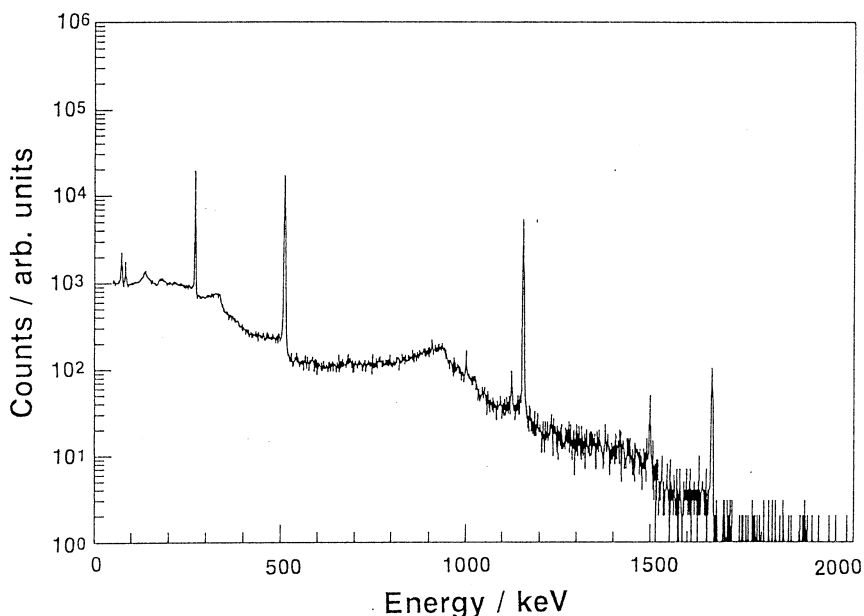


Fig. 1. γ -ray spectrum of ^{44m}Sc .

2. 2 Diffusion experiment

Single crystals of pure aluminum were grown in a high purity graphite crucible from 99.9995 mass% purity aluminum by the Bridgman method. Diffusion samples of 13 mm in both diameter and length were cut from the single crystal rod using a precision cutter. They were chemically polished and annealed in a H_2 atmosphere at 900 K for about 2.0×10^4 s to decrease the dislocation density. One face of each specimen was first polished with diamond paste and then electropolished in a solution consisting of ethyl alcohol and perchloric acid. The radioactive tracer ^{44m}Sc in the form of chloride was deposited on the flat surface of the specimens using an infrared lamp. A small amount of ethyl alcohol was added to the solution containing the tracers to deposit homogeneously them on the surface. The metallic tracer layer was produced by the reduction of the chloride with Al in the very early stage of diffusion annealing. The thickness of the tracer layer was estimated to be less than about 100 nm. The specimens were then diffusion annealed in a silica glass tube containing about 27 kPa at 293 K of purified He gas to avoid the oxidation of both the tracer and Al surface. The diffusion annealing was carried out in a resistance furnace controlled ± 1 K in the temperature range between 813 and 928 K. The diffusion time for each specimen was selected for $2(Dt)^{1/2}$ to be more than 100 μ m. The impurity-diffusion coefficients of Sc in aluminum were determined by serial sectioning using a precision microtome. The activities were measured using a Ge(Li) detector and a multichannel PHA. The thickness of each section was obtained from the section weight determined by a microbalance.

§ 3. Results and Discussion

The solution of Fick's second law for the initial condition of a thin-film is

$$C = \text{const.} \exp(-X_n^2 / 4 D^t \cdot t) \quad (1)$$

where C is the specific activity of a section, the center of which is X_n from the original surface, D^t the tracer diffusivity and t the diffusion time. Fig. 2 shows typical penetration curves of ^{44m}Sc in aluminum in a semilogarithmic plot of specific activity vs X_n^2 . The values of D were determined using Eq. 1. Fig. 3 shows the temperature dependence of the impurity-diffusion coefficients of ^{44m}Sc in aluminum determined in the present work. The

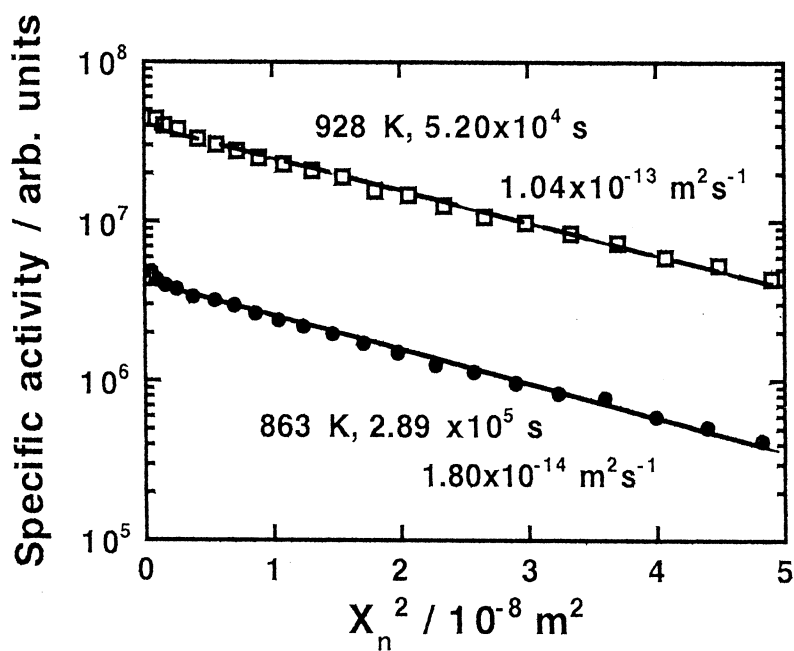


Fig. 2. Typical log specific activity vs. X_n^2 plots for impurity-diffusion of ^{44m}Sc in aluminum.

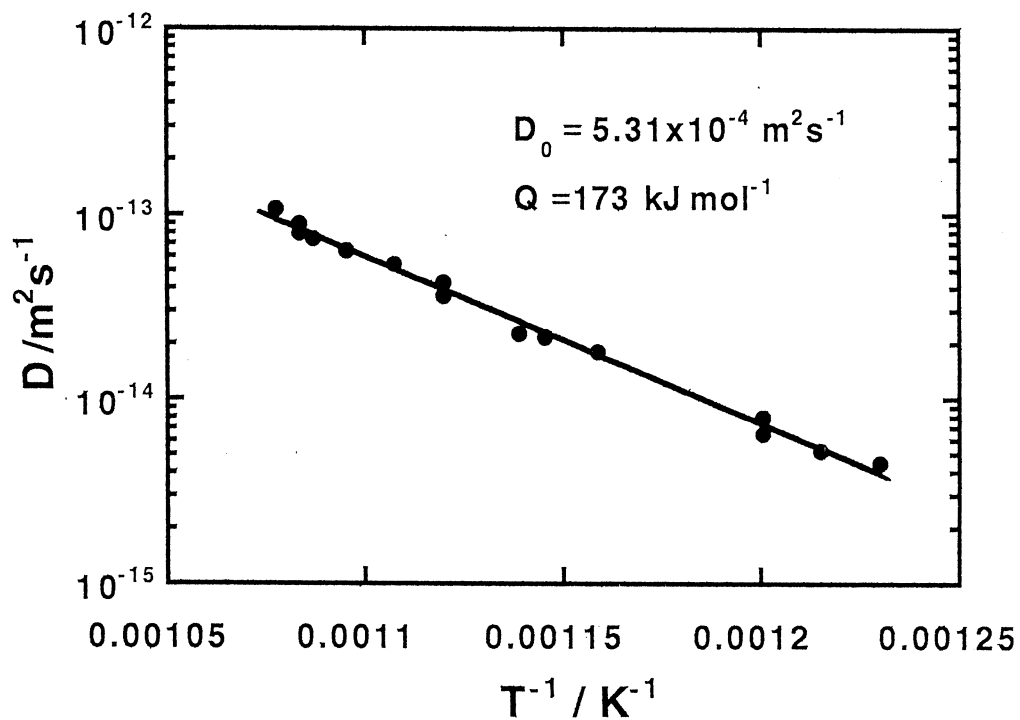


Fig. 3. Temperature dependence of D for impurity diffusion of ^{44m}Sc in aluminum.

temperature dependence of the diffusivities is given by

$$D = 5.31 \times 10^{-4} \exp(-173 \text{ kJ mol}^{-1}/RT) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

Table 1 Diffusion parameters for impurity-diffusion and self-diffusion in aluminum.

diffuser	$D_0 (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	$Q (\text{kJ mol}^{-1})$	worker
^{44}Sc	5.31×10^{-4}	173	Present work
Ti	1.12×10^{-4}	259	Ref. 11
V	1.6×10^0	302	Ref. 11
^{51}Cr	1.0×10^1	282	Ref. 6
^{54}Mn	3.17×10^{-2}	217	Ref. 8
^{59}Fe	7.7×10^{-1}	220	Ref. 6
^{57}Co	1.93×10^{-2}	168	Ref. 6
Ni	4.4×10^{-4}	145	Ref. 12
^{67}Cu	6.54×10^{-5}	136	Ref. 5
^{26}Al	2.25×10^{-4}	130	Ref. 3
Al	1.37×10^{-5}	123	Ref. 13

Fig. 4 shows the temperature dependence of diffusivities of ^{44}Sc in aluminum, in comparison of those³⁻¹⁰⁾ for Al and other elements in aluminum. Table 1 compares the diffusion parameters (D_0 and Q) for ^{44}Sc with those^{3), 5), 6), 8), 11-13)} for self-diffusion of aluminum and other impurity diffusion in aluminum. According to Fig. 4, the diffusivities are smaller than the self-diffusion of aluminum, but are larger than the impurity diffusivities of Mn and Zr. The diffusivities of ^{44}Sc in aluminum are nearly equal to those of Fe in aluminum. Table 1 shows that the activation energy for impurity diffusion of ^{44}Sc in aluminum is smaller than those for the other transition elements except Co and Ni in aluminum. Fig. 5 shows the results for Sc diffusion in aluminum plotted on the curves made by Rummel et al⁶⁾ of the diffusivities at melting temperature of aluminum and activation energy vs. the position of in the periodic table for the impurity diffusion of 3d transition elements and 4sp non-transition elements in aluminum. Fig. 5 shows the impurity diffusion in aluminum is controlled by the valence of impurities in aluminum and the behavior of Sc diffusion in aluminum agrees with the estimate from the results for Ti and V diffusion in aluminum.

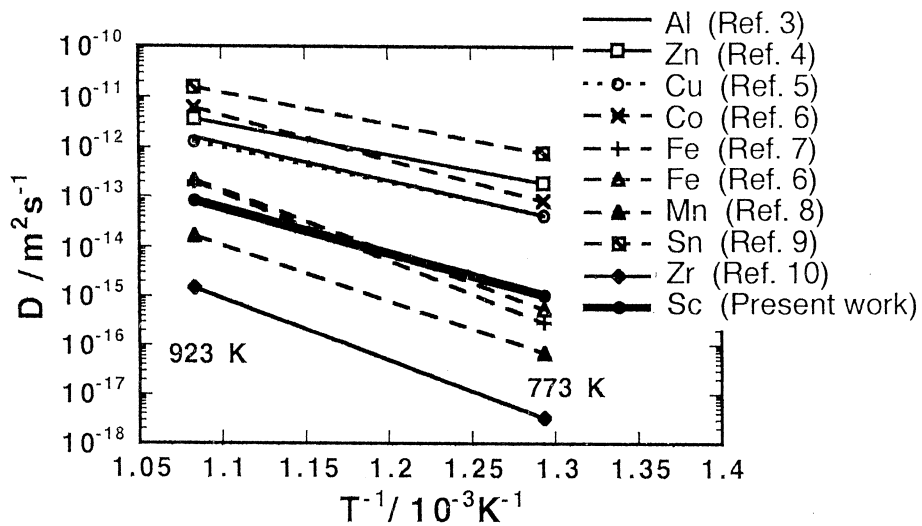


Fig. 4. Arrhenius plots of impurity diffusion coefficients of ^{44}mSc in aluminum, in comparison with those of other elements in aluminum.

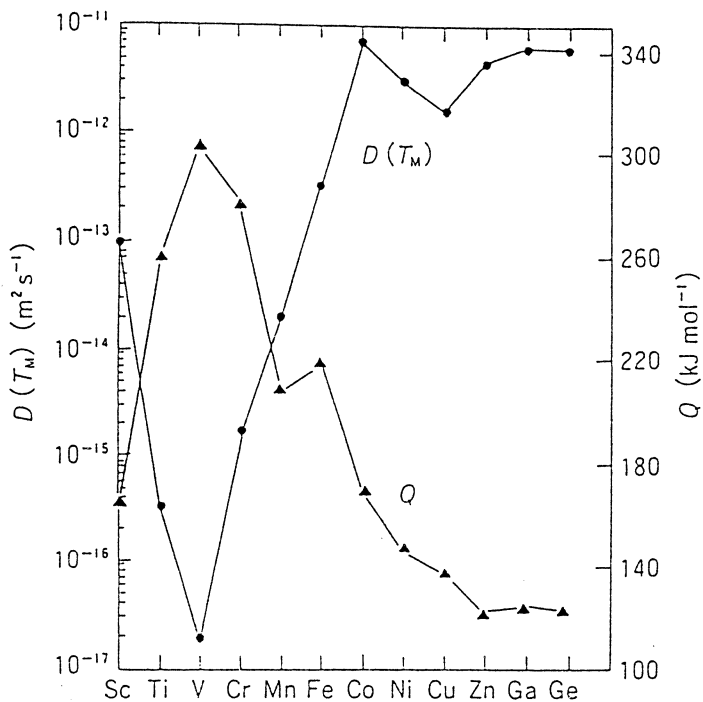


Fig. 5. Diffusivities $D(T_m)$ at melting temperature of aluminum and activation energy Q for impurity diffusion of 3 d-transition elements and 4 sp non-transition elements in aluminum.

§ 4. Conclusion

The radioactive tracer ^{44m}Sc was prepared using the photonuclear reaction $^{46}\text{Sc}(\gamma, n)^{44m}\text{Sc}$ and its diffusivities in aluminum single crystals were determined by the serial-sectioning method in the temperature range from 813 K to 928 K. The temperature dependence of the impurity diffusion coefficients of Sc in aluminum is given by the following equation : $D_{\text{Sc}/\text{Al}} = 5.31 \times 10^{-4} \exp(-173 \text{ kJ mol}^{-1}/RT) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The diffusivities are larger than those for the impurity diffusion of other 3d transition elements except Co and Ni and the diffusion Laboratory can be estimated from the position in the periodic period.

Acknowledgments

The author is grateful to members of the Linac machine group and radioisotope group at the Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, for the irradiation facilities.

References

- 1) S. Fujikawa, M. Takai, M. Sugaya and K. Hirano : J. Less-common Metals **63** (1979) 87.
- 2) For example, H.-H. Jo and S.-I. Fujikawa : Mat. Sci. Eng. **A171** (1993) 151.
- 3) M. Beyeler and Y. Adda : J. Phys. (Paris) **29** (1968) 345.
- 4) S. Fujikawa and K. Hirano : Trans. Japan Inst. Met. **17** (1976) 809.
- 5) S. Fujikawa and K. Hirano : Defect and Diffusion Forum **66-69** (1989) 447.
- 6) G. Rummel, T. Zumkley, M. Eggersman, K. Freitag and H. Mehrer Z. Metallkd. **85** (1995) 2.
- 7) G. M. Hood Philos. Mag. **21** (1970) 305.
- 8) S. Fujikawa and K. Hirano : Mater. Sci. Forum, **13/14** (1987) 539.
- 9) G. Erdelyi, K. Freitag and H. Mahrer : Philos. Mag. **63** (1991) 1167.
- 10) S. Fujikawa and K. Hirano : J. Nucl. Mat. **69/70** (1978) 564.
- 11) D. Bergner and N. van Chi : Wiss. Z. Padag. Hochschule Halle **15** (1977) 15.
- 12) G. Erdelyi, D. L. Beke, F. J. Kedves and I. Godeny : Philos. Mag. **B38** (1978) 445.
- 13) S. Dais, R. Messer and A. Seeger Mater. Sci. Forum, **15-18** (1987) 419.

Properties of Radioactive Fullerene Families

T. Ohtsuki, K. Masumoto¹, K. Sueki², K. Kikuchi²,
K. Ohno³, Y. Maruyama³, Y. Kawazoe³

*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
1-2-1, Mikamine, Taihaku, Sendai 982, Japan*

¹ *KEK, Tanashi-Branch, Midori-cho, Tanashi, Tokyo 188, Japan*

² *Tokyo Metropolitan University, Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-03, Japan*

³ *Institute for Material Research, Tohoku University, Aoba, Sendai 980-77, Japan*

Radioactive fullerenes labeled with ^{14}C and its derivatives ; such as the fullerene dimers and trimers, were produced by photonuclear and charged particle reactions and isolated in a liquid phase by radiochromatography. The ^{14}C nuclide exists in fullerene cages to extend of about 60-70% of the total amount of ^{14}C produced when the C_{60} sample was irradiated. Also, radioactive endohedral $^7\text{Be}@\text{C}_{60}$, $^7\text{Be}@\text{C}_{70}$ can be detected using radiochemical techniques in the final solvent. Such a ^7Be atom can penetrate into the fullerene cage to produce $^7\text{Be}@\text{C}_{60}$, $^7\text{Be}@\text{C}_{70}$ by a recoil process of the nuclear reactions. An *ab initio* molecular dynamics simulation was carried out to demonstrate that a direct insertion process is really possible. Both the experimental and the theoretical results were consistent with each other. This successful production of radioactive fullerenes demonstrates the structural stability and/or flexibility of fullerene cages.

§ 1. Introduction

Since the discovery of fullerene¹⁾ and by the development in method to produce large amount of fullerenes²⁻⁴⁾, many workers have been attracted to fullerenes and fullerene derivatives, because of their interesting physical and chemical properties such as metallofullerenes⁵⁻¹⁰⁾, fullerene molecules¹¹⁻¹³⁾, superconductivity¹⁴⁾, medicine¹⁵⁾. Recently, it has become noteworthy and important to study the properties or the behavior of fullerenes by applying radiochemical techniques¹⁶⁻²⁴⁾, since radioactive labeling of fullerenes and their derivatives is of considerable useful in following the location and metabolism of

these substances in living organisms. Previously radioactively labeled endohedral metallofullerenes were produced by neutron irradiation¹⁶⁻²⁰. However, a convenient means for labeling empty cage fullerenes is very desirable as empty cage species are much easier to synthesize and to handle.

Here, we demonstrate A) production of radioactive fullerenes labeled with ^{11}C and B) possibility of the insertion of atoms *a posteriori* into already created fullerenes: ${}^7\text{Be}$, ${}^{22}\text{Na} + \text{C}_{60} \rightarrow {}^7\text{Be}@\text{C}_{60}$, ${}^{22}\text{Na}@\text{C}_{60}$, by the recoil process following nuclear reactions using a photonuclear and a charged particle reactions.

§ 2. Experimental Procedures

A) Production of ${}^{11}\text{C}\text{C}_{59}$, ${}^{11}\text{C}\text{C}_{69}$ and porimers : About 10 mg of purified C_{60} , C_{70} samples and their mixture were wrapped with aluminum foil and set in a quartz tube. The sample was irradiated by bremsstrahlung of $E_{max} = 30$ MeV which was generated by the bombardment of a Pt plate with an electron beam at the 300 MeV electron linac in the Laboratory of Nuclear Science (LNS), Tohoku University. The average beam current was typically 120 μA . Each irradiation time was set to 20 min, corresponding to the half-life of ${}^{11}\text{C}$. The samples were cooled with a water bath during the irradiation. After the irradiation, The samples were dissolved in carbon disulfide (CS_2) and filtrated through a millipore filter (pore size = 0.45 μm) to remove insoluble materials. After evaporating the CS_2 solvent, the soluble fraction was dissolved again in an elution solvent and injected into a HPLC (High Pressure Liquid Chromatography). An appropriate elution solvent and column ; toluene-hexane (7 : 3) for Buckyclutcher²⁵, toluene for Buckyprep and toluene- CS_2 (3 : 10) for 5 PBB, was used to a HPLC separation, respectively. The elution behavior was monitored by a UV detector with a wave length of 280 nm for toluene and toluene-hexane (7 : 3), 380 nm for toluene- CS_2 (3 : 10) solvent, respectively. Two BGO scintillation detectors to coincidentally count the 511 keV annihilation γ -rays emanating from ${}^{11}\text{C}$ with a half-life of 20 min²⁶) were installed at the down stream of the UV detector. Data about the radiochromatogram were accumulated by means of a multi-channel scaler system (MCS), using a personal computer.

B) Production of ${}^7\text{Be}@\text{C}_{60}$, ${}^7\text{Be}@\text{C}_{70}$, ${}^{22}\text{Na}@\text{C}_{60}$: The two reactions for producing

producing ${}^7\text{Be}$ @fullerene, namely ${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$ and ${}^{12}\text{C} (\gamma, \alpha n) {}^7\text{Be}$ reactions, were used for the experiments (note that ${}^7\text{Be}$ decays to ${}^7\text{Li}$ with half life of 53.3 days and emits a 478 keV γ -ray ; see²⁶⁾). Also, to produce Na@fullerene, ${}^{23}\text{Na} (\gamma, n) {}^{22}\text{Na}$ reaction was used to the experiment. (1) ${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$ reaction ; A homogeneously mixed sample of C_{60} and Li_2C powder (mixed ratio in weight = 1 : 1) was wrapped with thin aluminum foil and irradiated with 12 MeV proton beam. The irradiation was performed at the Cyclotron Radio-Isotope Center (CYRIC), Tohoku University. The beam current was typically 2 μA and the irradiation time was set to about 2 hours. (2) ${}^{12}\text{C} (\gamma, n) {}^7\text{Be}$ reaction ; About 10 mg of purified C_{60} , C_{70} fullerene powder was prepared to the bombardment. Procedure of the experimental treatment was almost same as above A), though the irradiation energy of electrons was $E_{max} = 50$ MeV and the irradiation time was set to about 24 hours. (3) ${}^{23}\text{Na} (\gamma, n) {}^{22}\text{Na}$ reaction ; Here also a homogeneously mixed sample of C_{60} and Na_2CO_3 powder, about 10 mg (mixed ratio in weight = 1 : 1), was used to the experiment and the experimental procedure was also same as above A) and B)-(2), the irradiation energy of electrons was $E_{max} = 50$ MeV and the irradiation time was set to more than 50 hours. In all cases in B), the irradiated samples were also dissolved into CS_2 , and filtrated with a millipore filter (pore size = 0.45 μm) to remove insoluble byproducts and mixed materials. After evaporating the CS_2 solvent, the soluble fraction was dissolved again into toluene-hexane (7 : 3) eluent and injected into a HPLC column equipped with Buckyclutcher. The eluent fraction was collected in 20 or 40 sec intervals to monitor the specific γ -ray of ${}^7\text{Be}$ and ${}^{22}\text{Na}$. The γ -ray activities of all fractions (0 -20, 20-40, ..., 580-600, 600-640, 640-680, ...sec) were measured with the Ge detector, which indicates the amount of encapsulated ${}^7\text{Be}$ and ${}^{22}\text{Na}$. The ${}^7\text{Be}$ and ${}^{22}\text{Na}$ isotopes could be uniquely confirmed by the characteristic γ -ray, ${}^7\text{Be}$ for 478 keV and ${}^{22}\text{Na}$ for 1275 keV, respectively, and any other γ sources were ruled out.

§ 3. Results and Discussions

A) Figure 1 shows the two elution curves of the irradiated C_{60} sample in Buckyclutcher column, which are coincidentally observed by two BGO detectors (solid line) and a UV detector (dashed line). The horizontal axis indicates the retention time after injection into the HPLC and the vertical one the counting rate of the ${}^{11}\text{C}$ radioactivity corrected for the

decay of ^{11}C . Only one strong absorption peak was observed in the elution curve which was measured by the UV detector, but three peaks appeared in the curve measured by BGO detector. According to the figure, the first peak corresponds to the C_{60} absorption peak of UV. This peak can be assigned to $^{11}\text{CC}_{59}$ which is produced in a $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ reaction in the carbon atom of the C_{60} fullerene. The giant second and broad third peaks were observed at a retention time at 10 to 12 min and 20 to 26 min, respectively. These two peaks can be attributed to larger radioactive molecules than a C_{60} fullerene. As shown by dotted line in Fig. 2, two peaks around 7 and 25 min were also observed in the elution curves of the irradiated sample of C_{70} in Buckyprep column. The elution curve of the irradiated mixture sample ($\text{C}_{60} : \text{C}_{70} = 3 : 7$) was also shown in the same figure by solid line. Five peaks appeared; the first and second peaks can be assigned to $^{11}\text{CC}_{59}$ or $^{11}\text{CC}_{69}$ respectively, as confirmed by the UV detector. The peaks at the retention time of around 10 and 25 min were also detected in the each elution curve of the irradiated C_{60} (dashed curve) and C_{70} (dotted curve) respectively, though the peak at 15-16 min appeared only in the curve of the irradiated sample of mixture fullerene (solid curve). Therefore, this peak is considered to be due to the product of the coalesced reaction between the C_{60} and C_{70} cages. These experimental results may indicate that the last three peaks of solid line are dimerized fullerenes; namely $^{11}\text{CC}_{59}\text{-C}_{60}$, $^{11}\text{CC}_{59}\text{-C}_{70}$ or $^{11}\text{CC}_{69}\text{-C}_{60}$, $^{11}\text{CC}_{69}\text{-C}_{70}$ respectively. On the basis of these conjectures, the broad third peak in Fig. 1 was assumed to be a trimerized fullerene coalesced three C_{60} cages; $^{11}\text{CC}_{59}\text{-C}_{60}\text{-C}_{60}$. In order to confirm the process in question, irradiation with proton was applied to produce the radioactive fullerenes. In this case, ^{11}C is produced by a $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ reaction. The elution curve is very similar to that shown in Figs. 1 and 2. This fact indicates that the ^{11}C labeling is mainly caused by the recombination reaction between a stable carbon network and ^{11}C .

Yeretzian et al¹¹⁾ have reported evidence about coalescence products in hot and dense vapor of C_{60} and C_{70} fullerenes. McElvany et al¹²⁾ also found odd-mass dimer fullerenes from coalescence reaction in an ozone-gas phase; for example, C_{119} which consists of $\text{C}_{60}\text{-C}_{59}$. According to these previous findings, three last peaks of Fig. 2 are confirmed as due to products of coalescence reactions between two C_{60} s, a C_{60} and a C_{70} , and two C_{70} s, including ^{11}C , respectively.

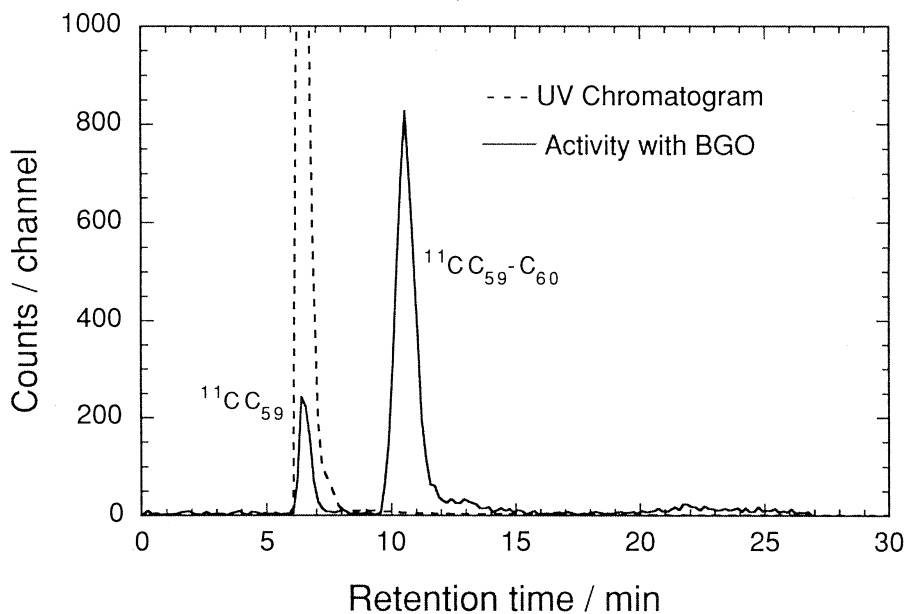


Fig. 1 . Elution curves of the irradiated C_{60} monitored simultaneously by a UV detector (dashed line) and two BGO detectors (solid line), respectively. The vertical scale for the elution curve (dashed line) monitored by a UV detector is in arbitrary units.

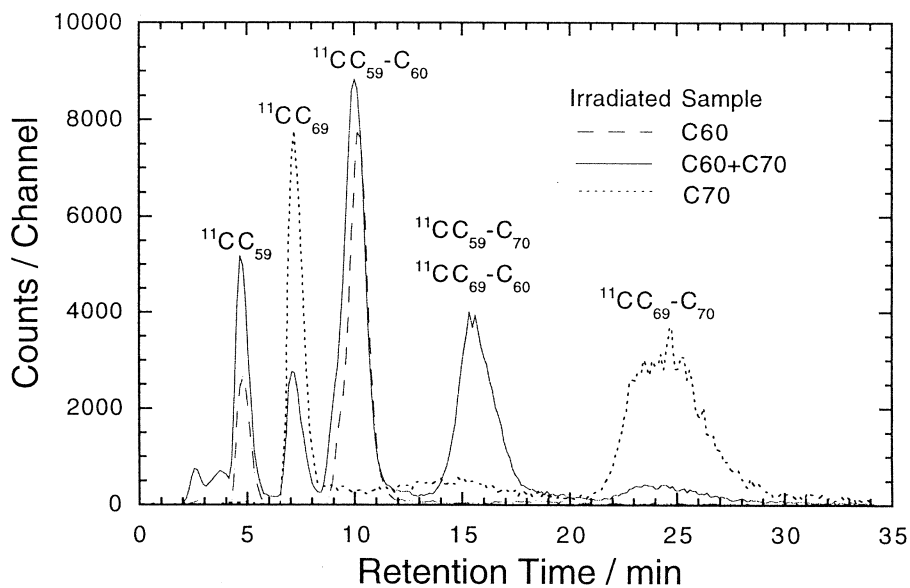


Fig. 2 . Elution curves of the irradiated C_{60} (dashed line), C_{70} (dotted line) and the mixture of C_{60} and C_{70} (solid line, the weight ratio of C_{60} to C_{70} is $3/7$), monitored by two BGO detectors in coincident, respectively.

γ -ray measurement with a Ge detector were used to determine the total amount of radioactive fullerenes produced by photonuclear reaction. The activity of the dissolved fraction in the C_{60} sample was 60-70% of the total activity of the C_{60} sample, but that for the C_{70} fullerene was about 20%. This may indicate that structural durability of C_{60} and C_{70} is different. The dissolved fraction mostly consisted of fullerene and of its derivative products which originated from the coalesced fullerene molecules and, therefore, a large part of the recoiled ^{11}C is assumed to have remained as fullerene and its derivatives. The derivatives seem to be in a chemically stable state in comparison with the dimer and trimer fullerenes which were detected by a mass-spectrometry, since unstable molecules such as the incompletely networked or coalesced materials, can be easily broken up by an interaction between the solvent and the fullerene cage. It was also found that the amount of radioactive fullerene produced by charged-particle induced reaction is several tens of times greater than the amount produced by photonuclear reaction. This indicates that the charged-particle induced reaction is a useful method for labeling fullerenes.

The form of the emitted neutron spectrum accompanying the photonuclear reaction is expected to be approximately Maxwellian and the average neutron kinetic energy seems to be about 2-3 MeV, as estimated from the photon absorption cross section²⁷⁾. The initial kinetic energy of the recoiled ^{11}C is estimated at about a few hundred keV which can be easily calculated by the conservation of momentum between the emitted neutrons and the recoiled ^{11}C . The energetic ^{11}C nuclide should destroy the fullerene cage, because its kinetic energies are estimated to be of a quite different order of magnitude compared with the energy of molecular bonding. Our observations suggest that the energetic ^{11}C nuclide is successfully recombined into fullerene cages to include the ^{11}C . Further, the disrupted cages react with neighboring cages with a high degree of probability. This fact may suggest the following labeling process. At first, The ^{11}C atoms are produced by nuclear reaction and remove from their own material. Then, the kinetic energy is released down in the sample to a magnitude of the appropriate energy level. Finally, the attack of ^{11}C induces the fullerene network to open up, and the open end of the carbon cage is recombined by taking in ^{11}C and/or by getting involved with the neighboring fullerene cage.

B) The solid curve in Fig. 3 indicates the absorbance monitored continuously by the

UV detector of proton irradiation by Cyclotron in the mixed sample of C_{70} and Li_2C powder. Only one strong UV peak was observed in the elution curve. This peak position corresponds to the retention time of C_{70} which is confirmed by the calibration run using the C_{70} sample before the irradiation. The solid circles in the figure also show the results of the γ -ray measurements for each fraction. The horizontal axis represents retention times (0-20, 20-40, ..., 580-600, and 600-640, 640-680, ...sec), which corresponds to the each fraction collected during 20 or 40 sec intervals, after the injection into the HPLC. The vertical axis represents the counting rates of 7Be radioactivities measured with Ge detector. One sharp peak of 7Be radioactivity was observed in the retention of 10-13 min. No peak of 7Be was observed in other time intervals (0-10 min and 13- min). A similar result was obtained in the $^{12}C(\gamma, \alpha n)^7Be$ reaction although the specific activity seems to be less than that of the $^7Li(p, n)^7Be$ reaction. The peak position of 7Be (closed circle) seems to shift slightly later than the UV peak of C_{70} . The same trend was observed in the metallofullerene

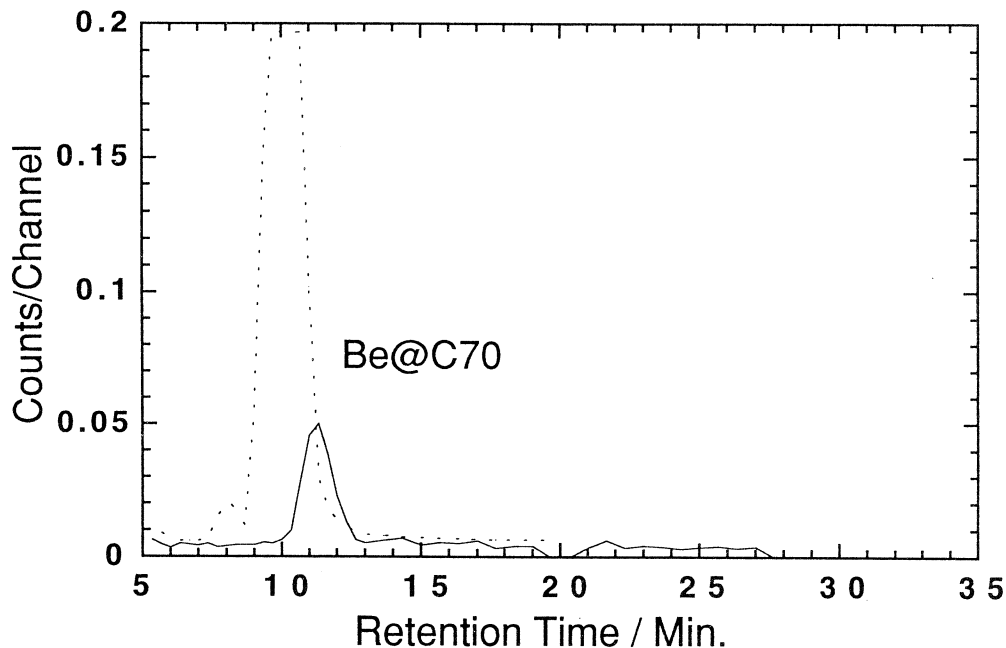


Fig. 3. Elution curves of the soluble portion of the crude extracted in the proton irradiated sample of 7Li and C_{70} . Solid circles indicate the radioactivities of 7Be in each fraction. The vertical axis show an absorbance of UV chromatogram of C_{70} .

extraction of $^{159}\text{Gd}@C_{82}^{16}$. This observation corroborates the formation of $^7\text{Be}@C_{70}$ following the nuclear reactions, since alkali-earth atoms such as ^7Be can not combine with carbon atoms of fullerene cages covalently and can be removed in the solvent if they were exohedral. Same result was observed in case of C_{60} as presented ref²²⁾. In the same experimental procedure, no activity of ^{22}Na was observed in all fraction. This result may indicate that ^{22}Na atom can not penetrate C_{70} cage.

In order to examine the possibility of encapsulation for Be and Na atoms theoretically, we also carry out an *ab-initio* molecular dynamics simulation. The calculation is based on an all-electron mixed-basis approach within the framework of the local density approximation (LDA). The method of simulation employed here is the same as our previous work concerning the stability and reactivity of C_{60} ²⁸⁾ and Li insertion to C_{60} ²⁹⁾. We put one C_{70} molecule and one Be and Na atoms in a supercell with zero and 5 eV initial velocities, respectively, for C_{70} , Be and Na. Once the electronic states are well converged by the steepest descent (SD) method, a charge transfer from the Be atom to the C_{70} molecule automatically takes place. In the calculation, we used 300 Slater Type atomic Orbitals (STO's) and 2969 plane waves. We divided the supercell into $128 \times 128 \times 128$ meshes and set 1 a. u. = 0.52918 Å = 2.7 meshes. We set $\Delta t = 4$ a. u. ~ 0.1 fs and performed six SD iterations between two adjacent updates of atomic positions in order to converge the electronic states. The simulation temperature was set to be $T = 1,000\text{K}$ by the rescaling velocity and a Fermi-Dirac distribution of the electronic states.

Let us first consider the case where a $^7\text{Be}^{2+}$ ion with 5 eV kinetic energy (K. E.) hits the center of a six-membered ring of C_{70}^{2-} perpendicularly. The result in this case is as follows: The Be ion penetrates into the cage through the center of the six-membered ring very easily. It passes deeply into the C_{70} ion and comes back to be trapped at a distance of 1.0 Å from the center of the same six-membered ring (see Fig. 4). The reason why the insertion proceeds very easily is that the ionic radius of Be^{2+} is 0.45 Å, much smaller than the radius of the hole of a six-membered ring. However, the situation is different in the case of alkali metal such as Na. The ionic radius of Na^+ is 0.96-1.16 Å, slightly larger than the radius of the hole of a six-membered ring. Therefore, the direct insertion process is rather unlikely because of the strong overlap between the electronic clouds of the cage surface and

Na ion.

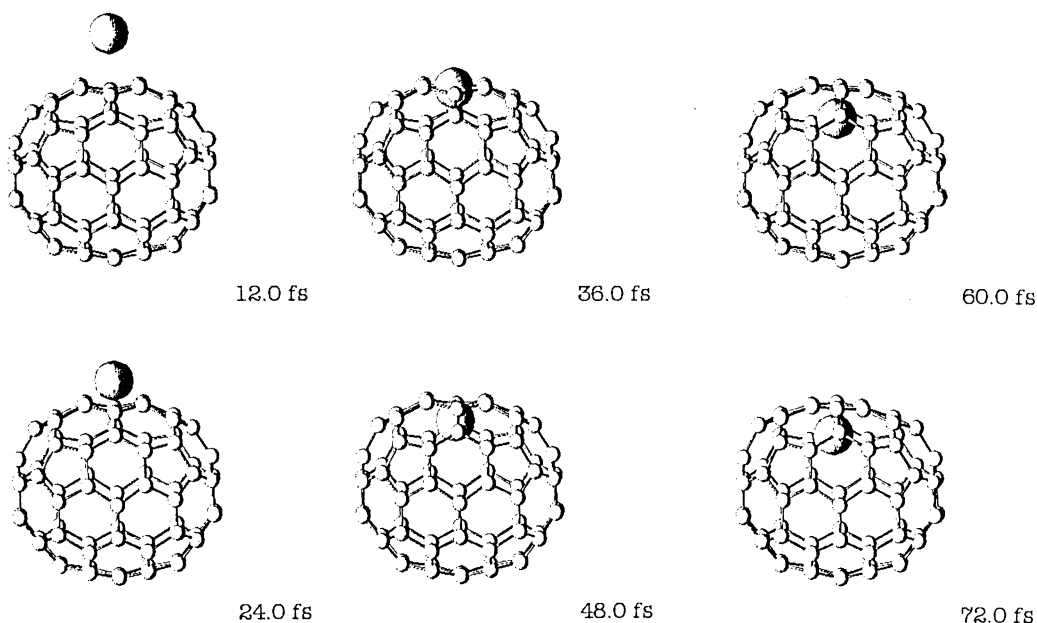


Fig. 4 . Snapshots of the simulation, where ${}^7\text{Be}^{2+}$ hits with 5 eV kinetic energy the center of a six-membered ring of C_{70}^{2-} . In this case, after 48 fs, ${}^7\text{Be}@C_{70}$ is created.

§ 4. Conclusion

Radioactive C_{60} and C_{70} fullerenes and coalesced products, such as fullerene dimers labeled with ${}^{11}\text{C}$, have been isolated and detected in a liquid phase by radiochromatography. For C_{60} fullerene, the ${}^{11}\text{C}$ nuclide exist in fullerenes to the extent of about 60-70% of the total amount of ${}^{11}\text{C}$ produced by nuclear reaction. This successful production of fullerenes labeled with ${}^{11}\text{C}$ demonstrates the structural stability and/or flexibility of fullerenes. To produce ${}^7\text{Be}@C_{60}$ and C_{70} , ${}^{22}\text{Na}@C_{60}$, mixed samples of fullerene and Li_2C and Na_2CO_3 powder were irradiated by proton and γ -ray. During the solvation process, only ideal ${}^7\text{Be}@C_{60}$, C_{70} and undamaged C_{60} , C_{70} molecules are extracted. A lot of fullerenes are destroyed until the ${}^7\text{Be}$ and ${}^{22}\text{Na}$ ions have lost their kinetic energies during the recoil process in the sample, and finally the insertion process occurs. The presence of ${}^7\text{Be}@C_{60}$ and C_{70} can be verified with the Ge and UV detectors. This fact is consistent with the result

of an *ab-initio* molecular dynamics simulation using the all electron mixed-basis approach.

All the authors are grateful to the technical staff of Laboratory of Nuclear Science (LNS) and Cyclotron Radio-Isotope Center (CYRIC) for the beam handling, and the Materials Information Science Group of the Institute for Materials Research, Tohoku University, for continuous support of the HITAC S-3800/380 supercomputing facilities. This work has been supported in part by a grant-in-aid program of the respected area "carbon clusters" by the Ministry of Education, Science and Culture, Inamori Fund and Kurata Fund.

References

- 1) H. W. Kroto *et al.*: Nature **138** (1985) 162.
- 2) W. Kratschmer *et al.*: Nature **347** (1990) 354.
- 3) G. Peter and M. Jansen : Angew. Chem., Int. Ed. Engl. **31** (1992) 223.
- 4) J. B. Howard *et al.*: Nature **352** (1991) 139.
- 5) Y. Chai *et al.*: Phys. Chem. **95** (1991) 7564.
- 6) R. D. Johnson *et al.*: Nature **355** (1992) 239.
- 7) J. H. Weaver *et al.*: Chem. Phys. Lett. **190** (1992) 460.
- 8) H. Shinohara *et al.*: J. Phys. Chem. **96** (1992) 3571.
- 9) H. Shinohara *et al.*: Nature **357** (1992) 52.
- 10) M. Takata *et al.*: Nature **377** (1995) 46.
- 11) C. Yerezian *et al.*: Nature **359** (1992) 44.
- 12) S. W. McElvany *et al.*: Science **260** (1993) 1632.
- 13) G. W. Wang *et al.*: **387** (1997) 583.
- 14) A. F. Hebard *et al.*: Nature **350** (1991) 600.
- 15) S. H. Fridman *et al.*: J. Am. Chem. Soc. **115** (1993) 6506.
- 16) K. Kikuchi *et al.*: J. Am. Chem. Soc. **116** (1994) 9775.
- 17) K. Sueki *et al.*: Fullerene Sci. Techno. **2** (1994) 213.
- 18) K. Kobayashi *et al.*: J. Radioanal. Nucl. Chem. **192** (1995) 81.
- 19) S. Yamago *et al.*: Chem. Biol. **2** (1995) 385.
- 20) T. Braun : J. Radioanal. Nucl. Chem. **203** (1996) 377.

- 21) T. Ohtsuki *et al.*: J. Am. Chem. Soc. **117** (1995) 12869.
- 22) T. Ohtsuki *et al.*: Material Sci. Eng. **217/218** (1996) 38.
- 23) K. Masumoto *et al.*: private communication.
- 24) T. Ohtsuki *et al.*: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 3522.
- 25) C. J. Welch and W. H. Pirkle : J. Chromatogr. **609** (1992) 89.
- 26) C. M. Lederer, V. S. Shirley, Eds. *Table of Isotopes*, 7th ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1978).
- 27) S. C. Fultz *et al.*: Phys. Rev. **143** (1966) 790.
- 28) K. Ohno *et al.*: Phys. Rev. **B53** (1996) 4078.
- 29) K. Ohno *et al.*: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 3590.

Ⅲ. 加 速 器 ・ 測 定 装 置

ストレッチャー・ブースタリングの基本設計

核理研, 高エ研*

玉江忠明・小山田正幸・加藤正博*

菅原真澄・山川達也

§ 1. 序論

原子核に高エネルギーの粒子を照射すると、粒子は原子核との相互作用の結果散乱され、照射粒子からエネルギーと運動量を得た原子核は核子やガンマ線、あるいはアルファ粒子などを放出する。これらの散乱粒子や放出粒子を検出して原子核の性質や反応機構を研究するのは、原子核物理の最も一般的な方法である。このとき、散乱粒子と放出粒子の両者を測定する実験は、同時計数実験と呼ばれ、一方だけを測定する単一アーム実験に比べ格段に優れた情報を提供する。同時計数実験においては、同一の反応で生じた散乱粒子と放出粒子だけを検出する必要があるが、実験にパルスビームを使用すると短時間のうちに多くの反応がおこり、検出した散乱粒子と反応粒子の対応関係が悪くなる。従って、そのような偶発的同時計数事象を抑えるために、同時計数実験には連続粒子ビーム加速器が不可欠となる。しかし電子加速器の場合、従来、大強度加速器として原子核研究に主役を勤めてきた常温のライナックは、加速空洞内での発熱の問題から、連続ビームを加速するのが難しく、ビームが出ている時間の割合を示すデュティ・ファクターはたかだか1%程度であった。この問題を解決し、連続ビームを得る加速器としては、加速エネルギーの小さな加速器の中を多数回粒子を通すマイクロトロン、加速空洞内での発熱を抑える超伝導ライナック、ライナックで加速したパルスビームを連続ビームに変換するパルスストレッチャーがあり、GeV級の加速器もすでに世界各地で稼働している。

東北大学では、1981年に世界最初の150MeVパルスストレッチャー（SSTR）を完成させ、パルスストレッチャーの有効性を示すとともにそれをういて同時計数電子散乱実験や標識付光子実験を多数行ってきた¹⁾。しかし、SSTRのエネルギー、ビーム強度は世界に伍した研究のためには不足で、大型のリングの建設が望まれていた。

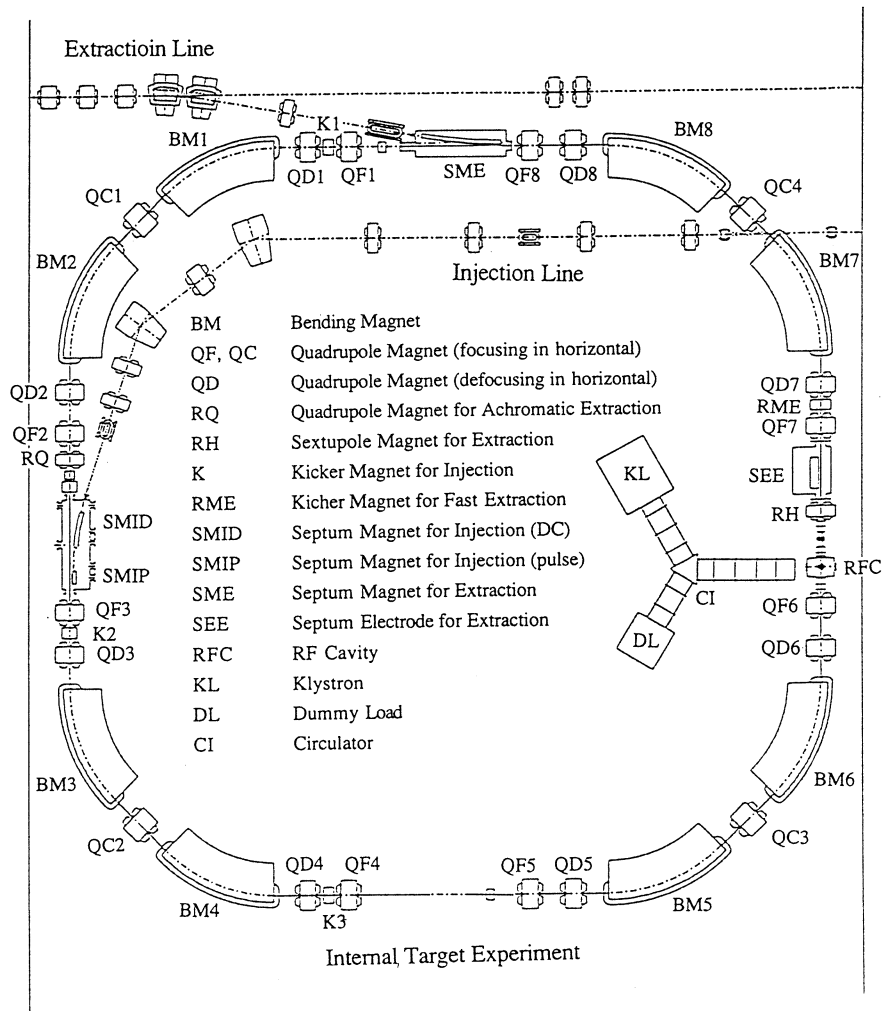
ストレッチャー・ブースタリングは、平成7年度から2年計画で東北大学理学部附属原子核理学研究施設の第2実験室に建設され、平成9年の秋には運転が開始される。このリングは、
1) 300MeV電子ライナックから入射されるパルスビームを直流化して取り出し、連続ビームによる原子核実験を可能にするパルスストレッチャーの機能、

- 2) 電子ビームを1.2GeVまで加速し、取り出したビームを放射光リングに打ち込むブースタの機能、
- 3) 1.2GeVに加速したビームを保持して標識付光子や内部標的による原子核実験を可能にする蓄積リングの機能、
- の3つの機能を備えている。

この報告では、主としてパルスストレッチャーの基本設計について説明するが、必要に応じて他の機能から要請される条件についても言及する。

§ 2. ストレッチャー・ブースタリングの概要

パルスストレッチャーから取り出されるビームのエネルギーは、一般に入射エネルギーにほ



第1図 ストレッチャー・ブースタリング全体図

第1表 ストレッチャー・ブースタリング諸定数。

周長	49.7512m
周回振動数	6025.83kHz
径	14.3053m
ラティス	DBAタイプ
周期数	4
ベータートロン振動数	$\nu_x = 3.30$ $\nu_y = 1.20$
モーメントム・コンパクションファクター	$\alpha = 0.037767$
クロマチシティ	$\partial \nu_x / \partial \delta = -5.7861$ $\partial \nu_y / \partial \delta = -4.9791$
○ストレッチャー・モード	
入射	3回転入射
取出し	三分整数共鳴 $\nu_x = 10/3$
(0.25GeV 以下)	単一エネルギー取出し
(0.25GeV 以上)	アクロマティック取出し
加速高周波	2856MHz (計画) (0.25GeV 以上)
ハーモニック数	474
○ブースタ・蓄積モード	
入射	多回転入射
取出し	速い取り出し
加速高周波	500.1MHz
ハーモニック数	83
加速時間	1秒

ぼ等しく、本計画の場合には最高0.3GeVである。ブースタおよび蓄積モードでは、ビームの入射後にRF加速が行われ、約1秒間で最高1.2GeVまで加速される。ブースタモードでは、ビームはその後、速い取り出しによって取り出され、放射光リング(建設要求中)に入射される。蓄積モードでは、加速した蓄積ビームを利用して内部標的実験や標識付光子実験が行われる。ブースタ・蓄積モードでは、ビームの入射効率が100%に近い必要はないが、パルスストレッチャーの場合には、3.3msecの周期で、ビームの入射・取り出しを繰り返すために、高い入射・取り出し効率が要求される。従ってパルスストレッチャーの性能を確保する為

には比較的長い入射・取り出し用の直線部が必要であり、そこでの電磁石配列やその磁場強度も、一定の制限をうける。又、内部標的実験用の十分長い自由空間も必要で、その位置でのビームサイズが小さい事も重要である。以上のような条件を考慮にいれて、ストレッチャー・ブースタリングは両方の機能が十分に達成できる様に設計されている。

ストレッチャーから取り出すことのできるビームの強度はリングに蓄積されている電子の個数で決まるので、大強度のビームを得るためにはできるだけ周長の大きなリングが望ましい。しかし、ストレッチャー・ブースタリングを設置する第二実験室の空間的な制約から、リングの周長は約50mに制限された。第1図にリングの全体図を示す。ストレッチャー・ブースタリングは径14.305m、周長49.751mで、3.1mの直線部が4ヶ所あり、入射部、取り出し部、RF加速部、内部標的部として使用される。第1表にストレッチャー・ブースタリングの諸定数、第2表にビーム定数を示す。

第2表 ビーム定数。

○ストレッチャーモード	
エネルギー	0.25GeV (最大0.3GeV)
周回電流	300mA (最大)
繰り返し	300pps
取り出しビーム	
電流	13 μ A
デューティファクター	90%
エミッタンス	$\sim 1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
エネルギー幅	0.07%
一周期のエネルギー損失率	0.937% (0.25GeV)
○ブースタ・蓄積モード	
入射ビーム	
入射エネルギー	0.25GeV
一周のエネルギー損失	0.115keV/turn
ダンピング後のビーム	
ダンピング時間	
水平方向	0.800sec
鉛直方向	0.720sec
エネルギー	0.343sec
エミッタンス	$8.9 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
エネルギー分散	1.2×10^{-4}
加速後のビーム	
エネルギー	1.2GeV
一周のエネルギー損失	61.1keV/turn
ダンピング時間	
水平方向	$7.23 \times 10^{-4} \text{ sec}$
鉛直方向	$6.51 \times 10^{-4} \text{ sec}$
エネルギー	$3.10 \times 10^{-4} \text{ sec}$
エミッタンス	0.17mm \cdot mrad
エネルギー分散	5.8×10^{-4}

リングからのビーム取り出しは、ブースタモードではキッカー電磁石を用いた速い取り出しを行ない、ストレッチャーモードでは、三分整数共鳴 ($\nu_x = 10/3$) による遅い取り出しを行なう。遅い取り出しには、既存の150MeVパルスストレッチャー (SSTR) と同様に、ストレッチャー・ブースタリングでもシンクロトン放射によるエネルギー損失を利用した単一エネルギー取り出しを採用する。

ストレッチャー・ブースタリングは、エネルギーを1.2GeVまで上げそれを保持するための500.1MHzのRF加速装置を備えている。リングをストレッチャーとして運転するときにはRF加速装置は必要としないが、エネルギーを1.2GeVまで上げるには大出力のRF源と加速空洞が必要である。

RF加速の必要なブースタモードや蓄積モードでは入射繰り返しの回数が少なく、入射効率も必ずしも100%に近い必要がないので、RF源としては蓄積リングで広く使われている500MHz周波数帯の加速装置を使用する。RF加速を行なう場合には、リングの周長はRF波長の整数倍でなければならないが、リングの周長49.751mは、500.1MHzの場合の波長(0.59941m)の83倍でこの条件を満たしている。また将来、電子ライナックと同じ2856MHzのRF加速装置を使用する場合にもリングの周長は波長(0.10497m)の整数倍(474倍)なので、RF加速を行ってより高いエネルギーでストレッチャー運転を行うことができる。

§ 3. リングの構成

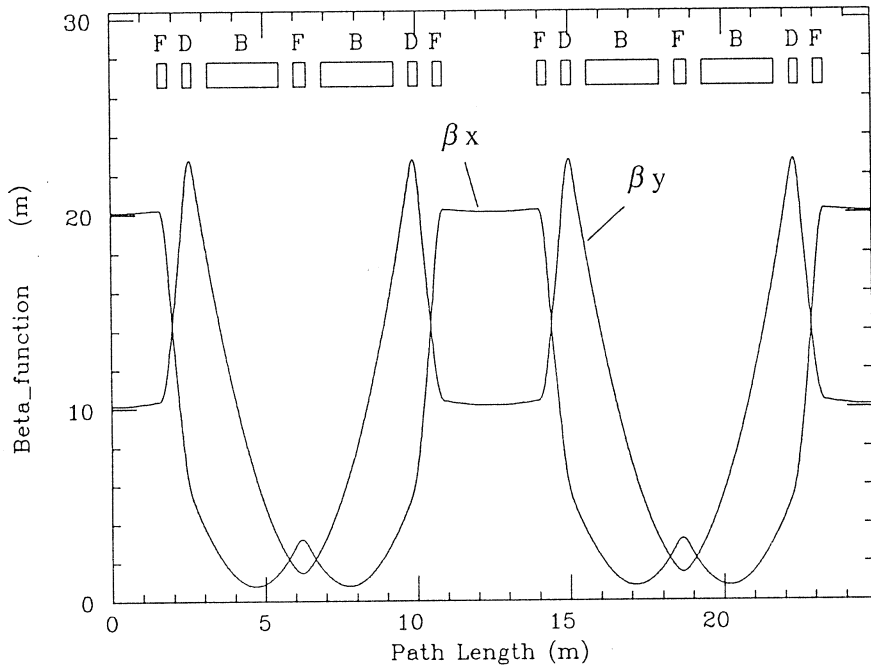
ストレッチャー・ブースタリングは、基本的には DBA ラティスを採用しており、偏向電磁石 8 台、四極電磁石 20 台、変調四極電磁石 1 台、六極電磁石 1 台、その他の入射・取り出し用電磁石類で構成されている。ここで、リングのベータトロン振動数 (チューン)、ベータトロン関数、エネルギー分散関数などのリングの基本的な性質は、8 台の偏向電磁石と 20 台の四極電磁石で決定されており、六極電磁石はビームの共鳴取り出しに使われる。また、変調四極電磁石は、300MeV 以上で RF 加速を行いながらアクロマティック取り出しでビームを取り出す際に使用される。

ストレッチャー・ブースタリングは内部標的実験やビーム入射・

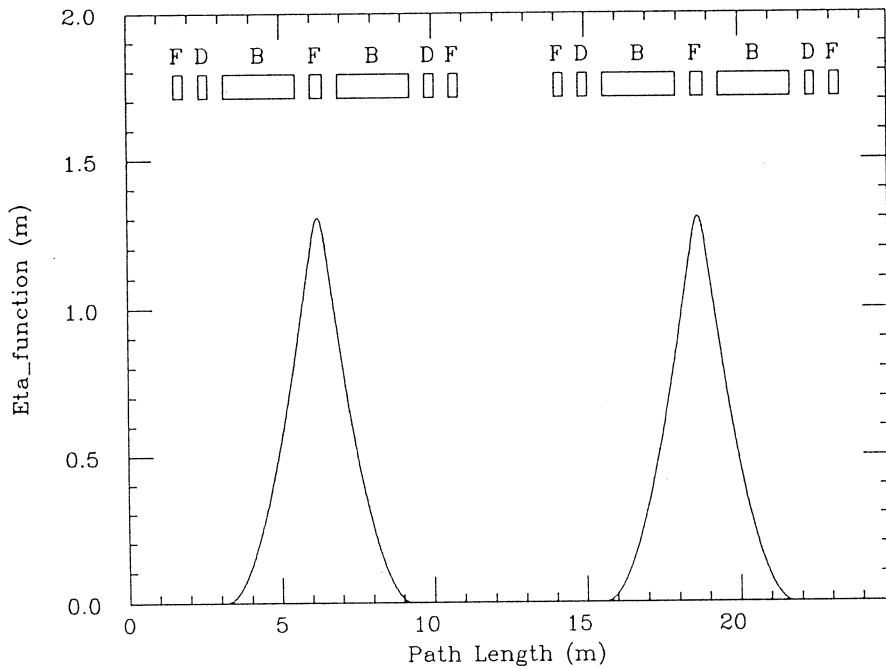
取り出しのための長い直線部を必要とするが、リングを幅 16m の既設の実験室に設置するためには周長は 50m 以下に制限する必要がある。そのため、偏向電磁石の磁束密度を大きくし (1.2GeV の時 1.33 テスラ)、軌道半径を $\rho = 3\text{ m}$ と極力小さくした。またできるだけ長い直線部を確保するために、偏向電磁石と四極電磁石の間隔は真空ポンプやビームモニターに必要な最低限の長さにした。第 3 表にリングの四分の一の磁石の配列と強度を示す。リングは 4 回対称になっている。又、第 2 図 にリング半周のベータトロン関数、第 3 図 にエネルギー分散関数を示す。図から分かるように、直線部でのエネルギー分散はゼロになっている。これらの関数は主としてストレッチャー運転に必要な条件で決定されている。

第 3 表 リング四分の一の電磁石配列および強度。

構成	
O 1 - QF - O 2 - QD - O 2 - BM - O 2 - QC - O 2 - BM - O 2 - QD - O 2 - QF - O 1	
ドリフト空間	O
O 1	1.5627m
O 2	0.5000m
偏向電磁石	BM
偏向角	45°
中心軌道半径	3m
長さ (実効長)	2.3562m
磁極間隙	5 cm
磁極端角度	0°
四極電磁石	
磁極長	
QF, QD	0.3m
QC	0.4m
ボア半径	5 cm
集束用 (水平方向)	
QF	$K = 2.0124\text{m}^{-2}$
QC	$K = 2.7628\text{m}^{-2}$
発散用 (水平方向)	
QD	$K = 2.2320\text{m}^{-2}$
但し $K = (dB/dx) \cdot (1/B_0 \rho_0)$	
dB/dx	磁場傾斜 (T/m)
$B_0 \rho_0$	磁氣的硬さ



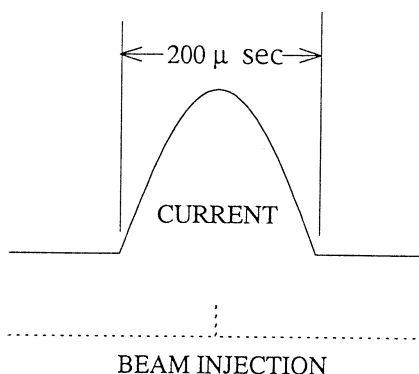
第2図 リング半周のベータトロン関数。



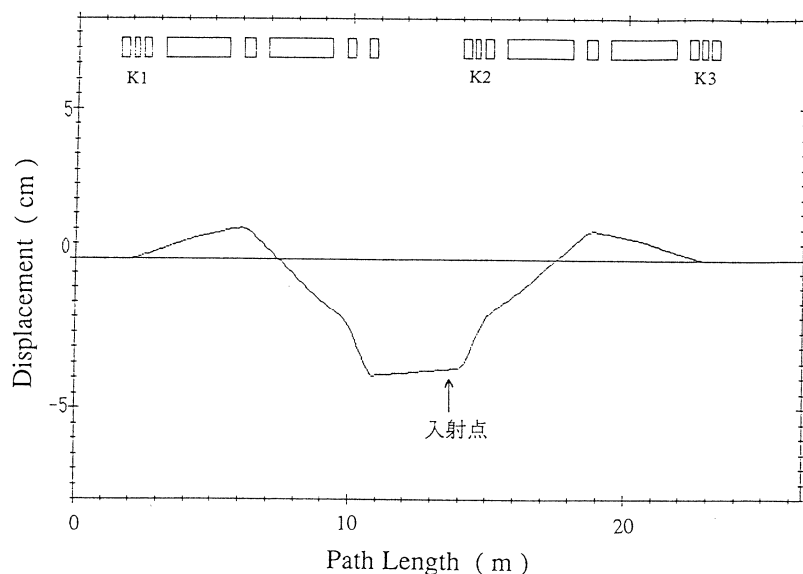
第3図 リング半周のエネルギー分散関数。

§ 4. ビーム入射

ライナックで入射エネルギーまで加速された電子は、ビーム入射系を經由し、2台のセプタム電磁石で合計 18° 偏向されてリングに入射される。最初のセプタム電磁石 (SMI・DC) は直流で偏向角は 15.4° 、2台目のセプタム電磁石 (SMI・パルス) は第4図のように $200 \mu \text{ sec}$ の正弦半波電流で励磁され、偏向角は 2.6° である。リングに入射された電子は平衡軌道の回りを振動しながらリングを周回する。(この振動をベータトロン振動という。) ビーム入射時にこの平衡軌道は第5図に示すように3台のキッカー電磁石によって SMI のセプタム近くに寄せられている。SMI・パルスの出口 (ここを入射点と呼ぶことにする) でのセプタムの位置は中心軌道から -45 mm 、キッカー電磁石を励磁した時の平衡軌道の位置は -37 mm である。この時のキッカー電磁石の偏向角を第4表に示す。ビームは、入射点で $(x, \theta) = (-54 \text{ mm}, 0.7 \text{ mrad})$ で入射され、それでベータトロン振動の振幅が決定される。第6図に入射粒子の最初の3周の様子を示す。キッカー電磁石によって入射点付近の電子の軌道がセプタム電磁石に寄せられている様子が分かる。ストレッチャーモー



第4図 入射セプタム電磁石パルス電流波形。



第5図 キッカー電磁石を励磁した時の入射点付近の平衡軌道。

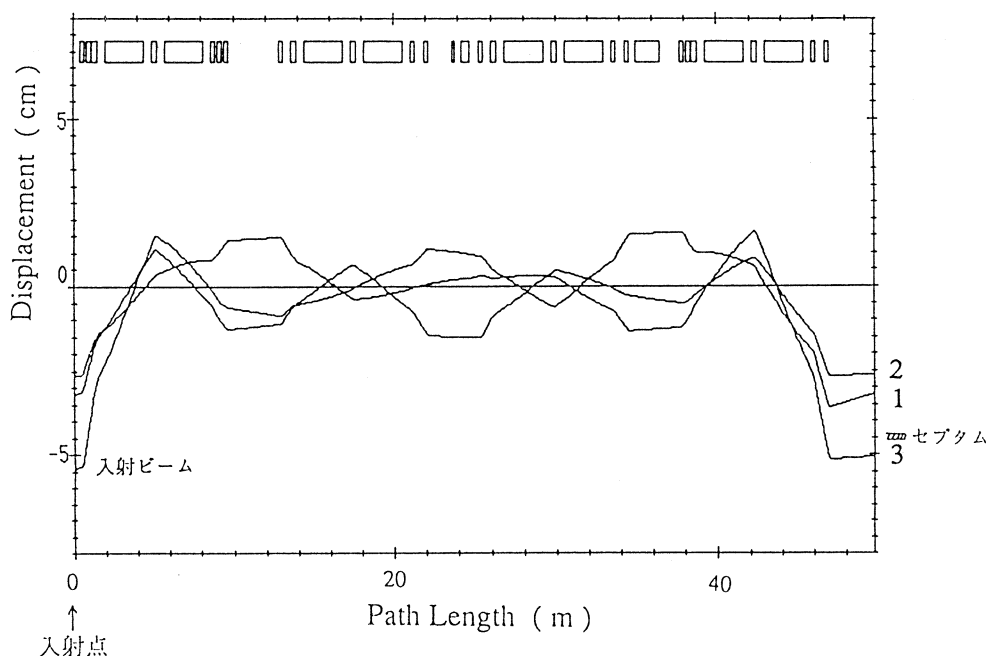
ドでは、リングの水平方向のベータatron振動数は三分整数に近いので、3周後にビームはセプトラムの中に戻ってくるのでこのままではビームは失われる。そこでリングに3周分のビームが入射された時点でキッカー電磁石は素早く切られ、平衡軌道はリングの中心軌道位置に戻される。この時、3台のキッカー電

磁石を切るタイミングは、第7図のようにビーム通過の時間差に等しい時間だけシフトさせておかなければならない。キッカー電磁石の磁場の立ち下がりには図に示したように約50nsecかかるので、3周入射500nsecのうち、最後の約5%の時間(約25nsec)はビーム入射を行わない。

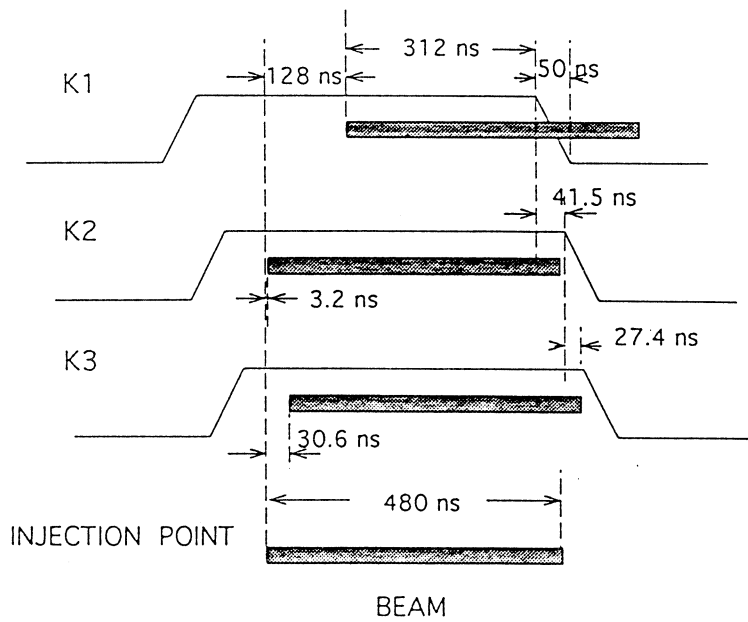
第8図に入射ビームの最初の10周の様子を示した。キッカー電磁

第4表 入射・取り出し電磁石強度。

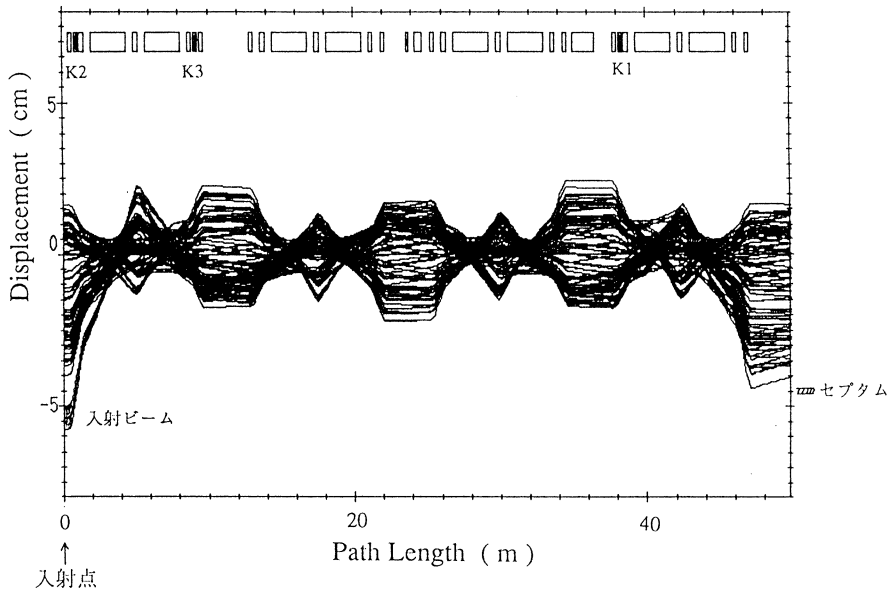
入射用キッカー電磁石	KM
磁極長	0.15m
偏向角	
KM 1	2.614mrad
KM 2	-1.777mrad
KM 3	2.402mrad
取り出し用六極電磁石	RH
磁極長	0.135m
ボア半径	8.25cm
	$k = 4.5m^{-3}$
	但し $k = 1 / (2 B_0 \rho_0) \cdot (d^2 B / dx^2)$
静電セプトラム電極	SEE
電極長	0.48m
偏向角	-5.501mrad



第6図 ビーム入射後もキッカー電磁石を切らなかったときの、入射後3周のビーム軌道。ビームは3周目にセプトラム内に戻ってくる。



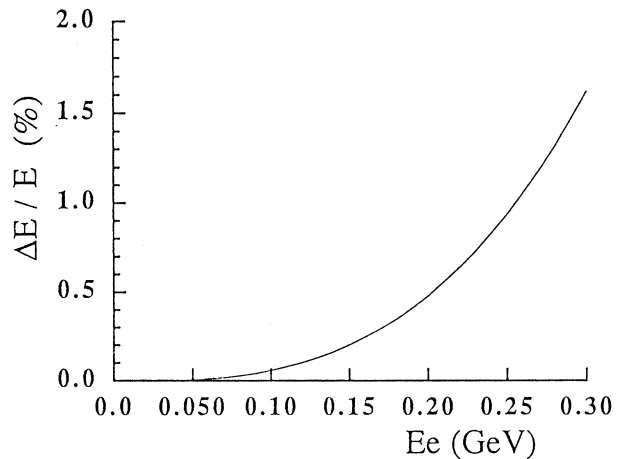
第7図 キッカー電磁石の磁場と入射ビームのタイミング関係。



第8図 ビーム3周入射直後にキッカー電磁石を切ったときの、入射後のビーム軌道。

石が切れた時点でビームがリング中心に戻り、安定に周回する様子が分かる。この計算に際しては、入射ビームの大きさ ± 4 mm, 角度広がり ± 0.2 mradを用いた。これらの値は、SMI・パルスの出口で入射系とリングのマッチングをとった時のもので、ライナックからの電子ビー

ムのエミッタンスの実測値から計算したビームサイズおよび角度広がり 2σ に相当する。またエネルギー広がりとして、250MeV運転時の入射ビームエネルギー幅に相当する $\pm 0.5\%$ を仮定した。この図から分かるように、ライナックからのビームのエミッタンスが十分小さければ、入射点において、入射ビームと周回ビームの間には約1cmの隔たりがあり、この部分にSMI・パルスのセパタムが位置する。



第9図 入射周期(3.3msec)間のシンクロトロン放射によるエネルギー損失率。

ストレッチャーモードの場合には、ビーム取り出しを考慮した入射を行う必要がある。ストレッチャーの運転は250MeV以下では§5で説明するように、RF加速を用いず、シンクロトロン放射によるエネルギー損失を利用したモノクロマティック取り出しでビームを取り出す。この方法では、入射ビームのエネルギー幅は、ビームの入射周期の間に電子がシンクロトロン放射で失うエネルギーに等しくなるように調節される。エネルギー $E(\text{GeV})$ の電子がリング1周の間に失うエネルギーは、偏向電磁石の曲率半径を $\rho(\text{m})$ と書けば、

$$U = 88.5E^4/\rho \quad [\text{keV/turn}] \quad (1)$$

で与えられる。したがって、入射周期 $T(\text{sec})$ の間のエネルギー損失率は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.26 \times 10^4 E^3 T}{\rho L} \quad (2)$$

となる。ここで $L(\text{m})$ はリングの周長である。ストレッチャー・ブースタリングの値($\rho = 3\text{m}$, $L = 49.7512\text{m}$, $T = 3.33 \times 10^{-3}\text{sec}$)を用いた時の $\Delta E/E$ を第9図に示す。

§5. ビーム取り出し

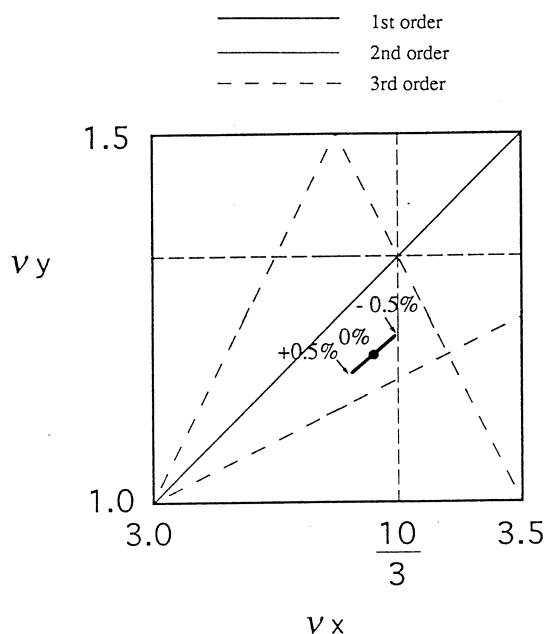
リングからのビーム取り出しは三分整数共鳴($\nu_x = 10/3$)を利用して水平面内のモノクロマティック取り出しで行われる。リングに蓄積された電子ビームのエネルギー偏差 $\delta = (E - E_0)/E_0$ とベータトロン振動数の関係を第10図の共鳴線図中に示す。リングの中心ベータトロ

ン振動数は共鳴振動数よりわずかに小さい3.3に設定されている。また、エネルギーと振動数の関係を示すクロマティシティはこのリングでは $\partial \nu_x / \partial \delta = -5.79$ なので、電子のエネルギーがリングの中心エネルギーより0.5%小さくなったときに共鳴がおこる。リング内を周回する電子はシンクロトロン放射でエネルギーを失うにしたがって共鳴線方向に移動し、共鳴エネルギーに達した電子から順次取り出される。入射ビームのエネルギー下限値をこの共鳴エネルギーに等

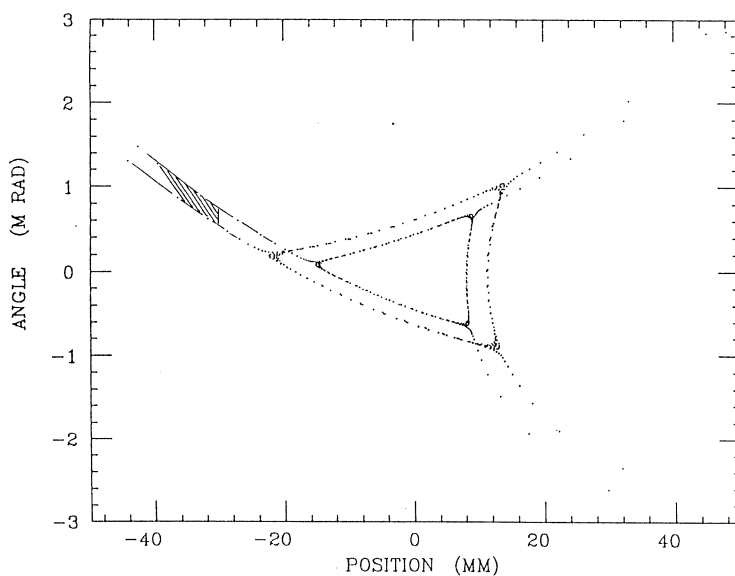
しく、また、エネルギー幅を式(2)で与えられる値に設定しておけば、入射直後からビーム取り出しを開始させ次の入射の直前ですべて取り出すことができる。

共鳴振動をおこしたビームのSEE入口の位置での位相空間における運動の様子を第11図に示す。図の斜線の部分が、SEEで切り取られてリング外に取り出

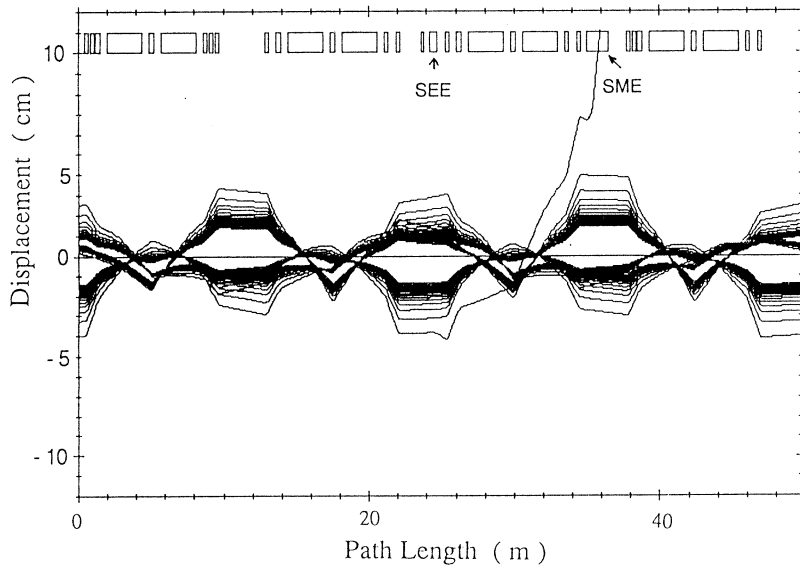
される部分である。SEEのセプタムワイヤーと電極の間隔は1.3cmなので、取り出しビームの振幅の増加幅がワイヤー位置で、1cm以下になるようにベータトロン振動数と六極電磁石の



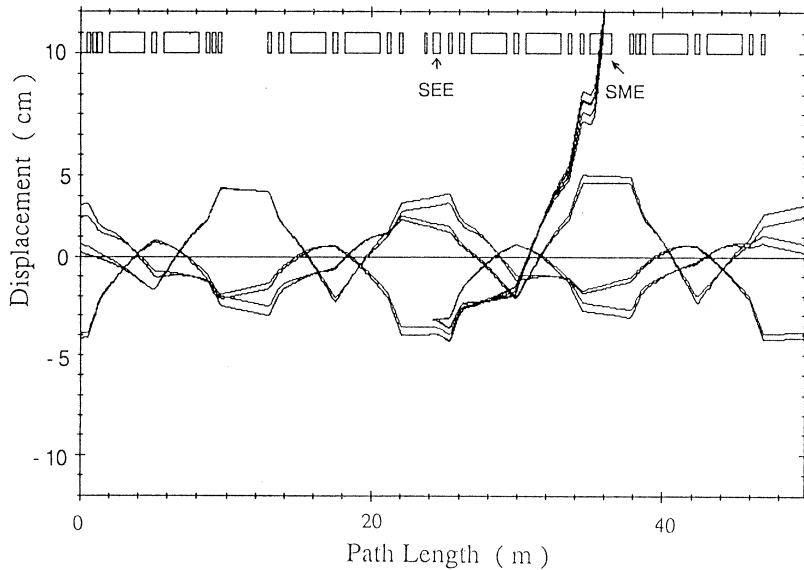
第10図 共鳴線図とビームのベータトロン振動数 (チューン)。



第11図 取り出しセプタム電極位置における共鳴をおこした粒子の位相空間での動き。



第12図 共鳴をおこした粒子の周回運動の様子。電子は最終的に静電セプタムとセプタム電磁石によってリングから取り出される。



第13図 周回ビームの最外側軌道と取り出しビームの位置関係。

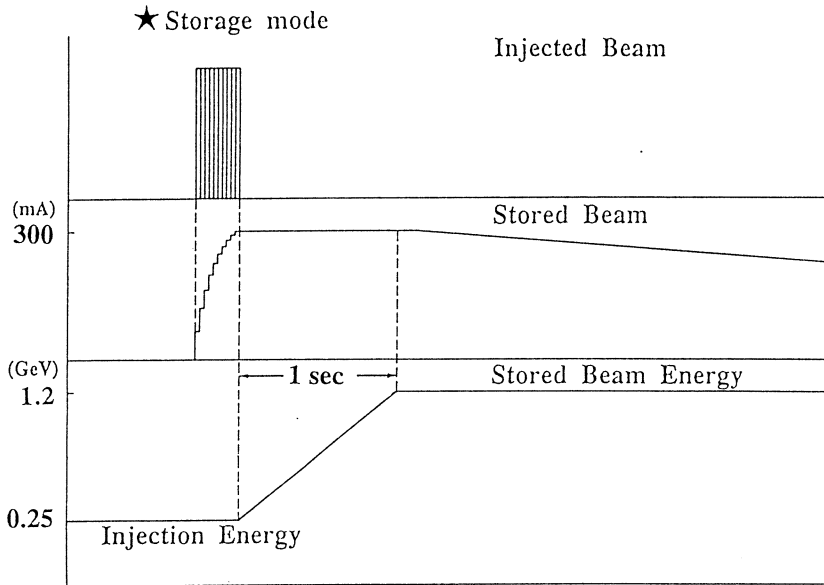
強度を調節してある。図から分かるように、内側のビームのピッチは外側より大きい。この図の斜線の部分から求めた取り出しビームのエミッタンスは約 $1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ である。また、外側のビームは若干低いエネルギーで取り出されるため、取り出しビームは約 0.07% のエネルギー幅を持つ。共鳴振動をおこしたビームがリング中を周回する様子を第12図に示した。第11

図は、この図の中のSEE入り口における中心軌道からの距離 (POSITION) と角度 (ANGLE) を周回毎にプロットしたもので、第12図の中で線が密集している部分が第11図の三角形の頂点に対応している。共鳴をおこして三角形の頂点から離れた電子はしだいに振幅を増加させ、SEEで切り取られた後、セプタム電磁石 (SME) を通ってリングから取り出される。第12図は、ビームに幅を持たない場合の様子であるが、実際には第11図から分かるようにビームは位置的にも角度的にも幅を持っている。この幅を考慮して、SEEで切り取られたビームと切り取られる直前のビームの運動の様子を第13図に示した。この図から分かるように、取り出しビームは出射セプタム電磁石 (SME) の入口で約1.5cmに広がる。また SME 直前の四極電磁石 (QF8) 中でビームは中心軌道から約8cmまで離れるので、この部分のビームダクトを広く作っておく必要がある。

§ 6. ブースタ・蓄積モード

ストレッチャー・ブースタリングを蓄積リングとして使用する実験としては、内部標的実験や標識付光子実験などの原子核実験、電子が偏向電磁石で曲げられるときに発する放射光を利用しての実験が考えられている。

リングは最高1.2GeVの電子を蓄積することができるが、入射用ライナックの最高エネルギーは300MeVなので、運転の容易な250MeV程度のビームを入射した後、RF加速によって約1秒で最終エネルギーまで加速する。ライナックから入射される電子ビームのピーク電流は約100mAなので、リングにおける蓄積電流は最大300mAを予定している。しかしライナックとリングのRFの振動数が異なる為に入射ビームを完全に蓄積することは不可能であり、また§4で述べたように普通の方法では入射可能なビームは最高3周なので、300mAのビームを蓄積するには工夫が必要である。ひとつの方法はベータトロン振動数をわずかに変化させる方法で、 $\nu_x = 3.25$ 付近で運転すれば4回転までの入射が可能になりその分だけ蓄積電流を増やすことができる。また $\nu_x = 10/3$ の共鳴を利用した多周入射も考えられている。ビーム入射に数秒かけても実験に支障のない場合にはダンピングを利用して多数回ビーム入射を行うことも可能である。リングに入射された直後のビームは中心軌道の回りに全幅約2cmに広がっているが、放射光の放出とRF加速の作用によるダンピングと呼ばれる効果により第2表に示したように、250MeVの場合でも1秒以内に直径1mmまで縮小する。このように蓄積ビームのベータトロン振幅が小さくなった後では、平衡軌道を入射セプタムに3cm程度近づけ繰り返し入射を行うことが可能である。



第14図 蓄積モードでのストレッチャー・ブースタリングの運転。

リングに十分な電流が蓄積されると、RFの加速電圧とリングの電磁石強度は第14図のように同時に上げられ、約1秒で最高1.2GeVまで加速される。内部標的実験では加速後に標的照射とデータの蓄積が始まり、蓄積電流が減少し実験効率が悪くなった時点で蓄積電子は捨てられ、再度ビームが入射される。ブースタモードでは加速終了後、取り出しキッカー電磁石(RME)が励磁され、取り出されたビームは放射光用の蓄積リングに打ち込まれる。

参 考 文 献

- 1) T.Tamae, M.Sugawara, K.Yoshida, O.Konno, T.Sasanuma, M.Muto, Y.Shibazaki, T.Tanaka, M.Hirooka, K.Yamada, T.Terasawa, S.Urasawa, T.Ichinohe, S.Takahashi, H.Miyase, Y.Kawazoe, S.Yamamoto and Y.Torizuka: Nucl. Instr. and Meth. **A264** (1988) 173.

Report on Design of Magnets for STB

B. Feng*, M. Kato¹, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Sato², M. Sugawara,
T. Tamae and T. Yamakawa

Laboratory for Nuclear Physics, Tohoku University, Sendai 982, Japan

¹*KEK, National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba 305, Japan*

²*Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980, Japan*

The stretcher-booster ring (STB) at Tohoku University is constructed and will be commissioned in this year. Its lattice is a double bend achromat structure. In this report, we conclude the design results of the main magnets such as the bending, quadrupole and septum magnets. The simulation values of bending magnets are compared with the measured results.

§ 1. Introduction

The stretcher-booster ring (STB) at Tohoku University^{1,2)}, which includes three functions of stretcher, booster and storage ring, is constructed and will be commissioned in this year. Its circumference is about 50m and one of the four straight sections with 3.1m can be used for internal target nuclear experiments and for insertion devices. The beam energy range of the STB is tunable from 0.3 to 1.2 GeV as a storage ring. The maximum energy is 300 MeV as a stretcher and 1.2 GeV as a booster for a further project of a storage ring³⁾ with energy 1.5 GeV at Tohoku University.

The layout of the STB is shown in Fig. 1. Its lattice has a double bend achromat (DBA) structure and consists of eight bending magnets, twenty quadrupole magnets, a modulated quadrupole and a sextupole for beam extraction. In addition, there are another three septum magnets used to inject and extract the electron beam. These magnets except the sextupole and septum magnets are made of laminated iron cores and the main magnets consist with

*Visiting scientist from the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800, P. R. China.

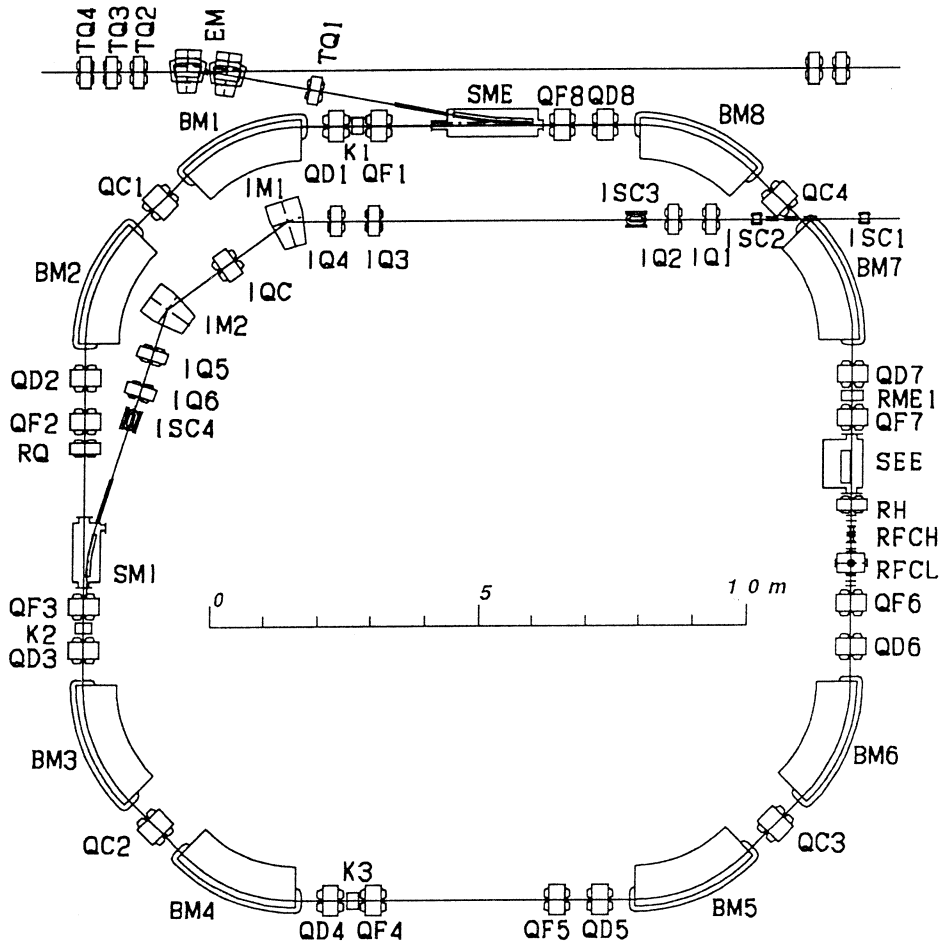


Fig. 1. Layout of the STB.

water-cooled coils. The bending radius of the dipole magnets is restricted to 3m in order to install the STB in the existing experimental room of 16m wide, and to realize a relative long straight section for the internal target system. Table I summarizes the parameters of a quarter lattice of the STB.

We used a 2-dimensional electromagnetic field simulation code called POISSON⁴⁾ to analyze the field distribution for all of the magnets and to optimize their design. These magnets have been finally designed and constructed by the Mitsubishi Electric Corporation. In this report we present the design results of the main magnets of the STB. In Sec. 2, we present the optimized design results of the bending magnet, which are compared with the

Table I . A quarter lattice of the STB.

<i>Configuration</i>	
O1-QF-O2-QD-O2-BM-O2-QC-O2-BM-O2-QD-O2-QF-O1	
<i>Drift Space</i>	
O1	1.567m
O2	0.50m
<i>Bending Magnet</i>	
Bending Angle	45°
Bending Radius	3m
Length	2.3562m
Edge Angle	0°
<i>Quadrupole Magnet</i>	
Length	$QF=QD=0.3\text{m}$
	$QC=0.4\text{m}$
Bore Radius	$R=0.05\text{m}$
Focus (horizontal)	$QF, k=2.0124\text{m}^{-2}$
	$QC, k=2.7628\text{m}^{-2}$
Defocus (horizontal)	$QD, k=-2.2320\text{m}^{-2}$

measured results of the magnetic fields. The design results of the quadrupole magnets and the septum magnets are shown in Sec. 3, and Sec. 4, respectively.

§ 2. Bending Magnet

The STB ring includes eight C-shaped bending magnets with same field distribution. They are sector magnets where the ideal path of the electron beam enters and exits normal to the magnet pole edge. The cross section of the bending magnet is illustrated in Fig. 2. The total deflection of the beam in a dipole is 45 degrees with a bending radius of 3 meters so that its path length is about 2.356m. The dipole has a 50mm gap and 250mm pole width. Its pole and return yoke are made of laminated steel, 50A600, with thickness of 0.5mm. The field excitation coil for each pole consists of 24 turns made of copper hollow conductors. The cross section of conductor is $18 \times 14\text{mm}^2$ with hole diameter of 10mm. The coils are cooled by water with a flow capacity of 53.2 l/min. The temperature of the cooling water passing a dipole magnet will increase about 10°C. The magnetic field distribution was analyzed with the 2-dimensional code POISSON. In the calculation, we

used internal material characteristics in the POISSON code instead of that of the silicon steel of 50A600 and also assumed its stacking factor is unity.

Fig. 3 shows the magnetic field lines in the cross section generated with the POISSON for the current of 1170 A. The magnetic field distribution is shown by the solid line in Fig. 4. The dashed line in the figure shows field flatness around the center of the pole by the field deviation. The field strength

changes in the range of 0.01% in the central 50mm region of the 250 mm wide pole. As an example, the measured field deviation of BM2 is presented by square marks in Fig. 4. The maximum field is 1.3322 T at the coil current of 1170 A. It should be noticed that the measured field deviation in the central region is less than 0.01 %, as numerical calculation indicated, that satisfies the design requirement for field homogeneity. Fig. 5 shows the field excitation curve of BM2 with simulation by POISSON. Beyond 1000 A, the magnetic flux density increases non-linearly with the current. Similar saturation appears also in the measured results.

One of purposes of the simulation with the POISSON is to fix the pole length by evaluating the fringing field. While the fringing field extends orthogonally to the face of the magnet, electron beams have some deflection in the region. The fringing field at the end of the bending magnet was simulated with the POISSON. The geometrical configuration for the simulation is illustrated in Fig. 6. Because the POISSON is a 2-dimensional code, we add a return leg with infinite permeability to the magnet pole of 200mm. We put it far enough not to affect the field in the area of our interest. We assumed the magnetic field is constant well inside the magnetic entrance. In order to decrease the effect of the fringing field at the edge, we cut the pole shoe by four steps with height and width of 5mm for each one. At the entrance of the magnet, the vertical field component, as shown in Fig. 7, increases gradually from the field-free region to the maximum value in the interior of

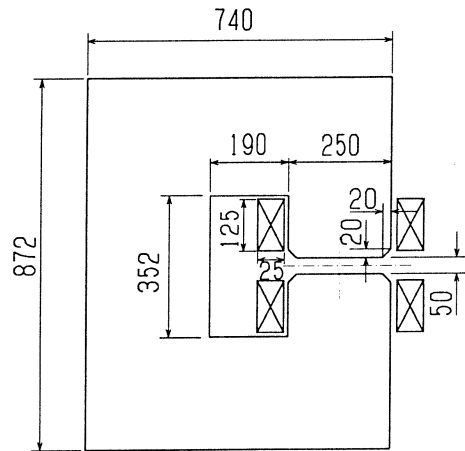


Fig. 2. Cross section of the bending magnet.

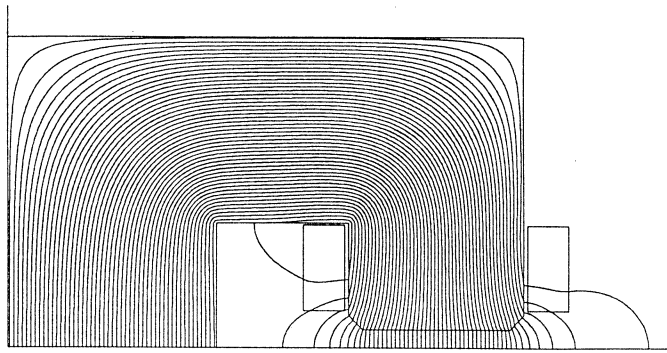


Fig. 3. Magnetic field lines generated with the POISSON for the bending magnet.

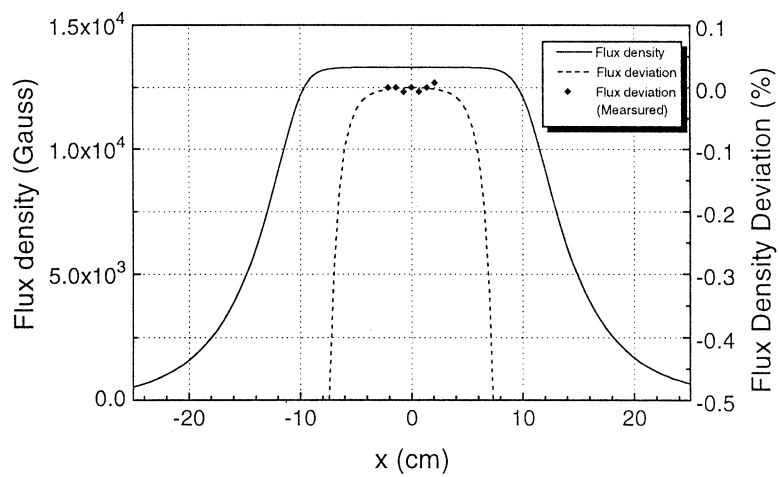


Fig. 4. Magnetic field distribution in the medium plane (solid line) and the field deviation (dash line). Square marks present the measured values of field deviation of the bending magnet BM 2.

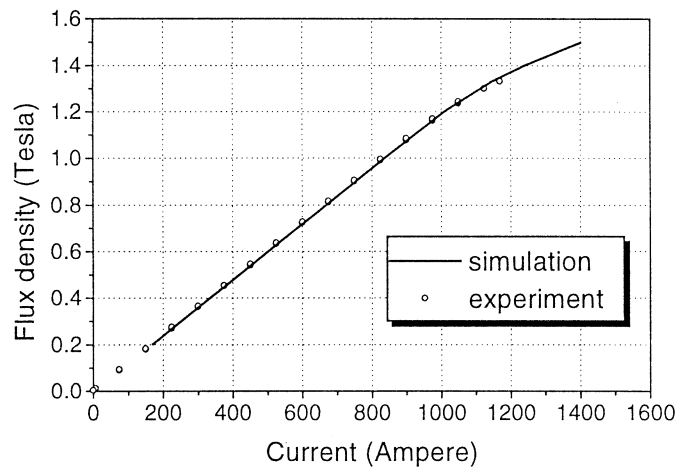


Fig. 5. The excitation curve of BM 2.

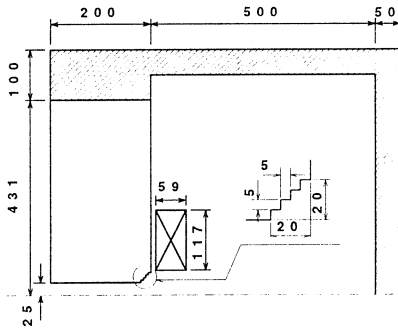


Fig. 6. Geometrical configuration for calculating the fringing field of the bending magnet.

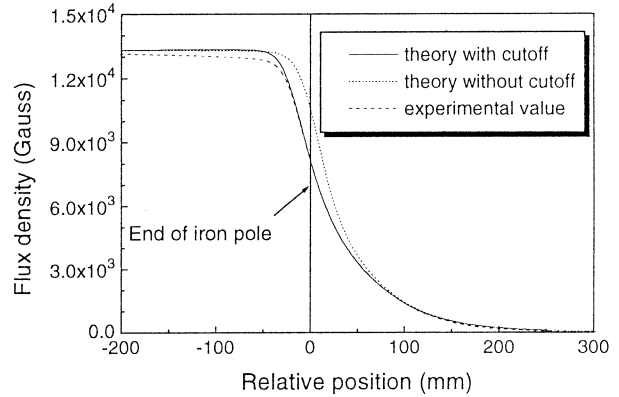


Fig. 7. Fringing field distribution of the bending magnet.

the dipole. At the maximum field of 1.33 T, the calculated effective edge locates 27.25mm outside of the geometrical pole face. It moves outwards by 0.2mm at excitation of 0.2 T. When there is no cut at the pole shoe, the location of the effective edge is 36.60mm outside the pole face for 1.33 T, and 38.05mm for 0.2 T, respectively. The difference is 1.45mm. Obviously, the cut of the pole shoe improves the difference of the effective length for the change of magnetic fields. According to the simulation, we shortened the pole cutting both entrances by 25mm. The measured field distribution is compared with the calculated one in Fig. 7. The measured effective length is 2345.46mm at 1.33 T and 2364.68mm at 0.2 T for BM2. The difference, 19.22mm, is much larger than that of calculation. This may be caused by the difference of material characteristics and stacking factor between the calculation and the real one, as well as fabrication errors.

§ 3. Quadrupole Magnet

The STB ring has eight quadrupole focus (QF) and defocus (QD) magnets, respectively, and another four quadrupole focus magnets (QC). The pole length of QF and QD is 300mm, and that of QC is 400mm. All of them have a bore radius of 50mm. Their cores are made of laminated steel, 50A600, with thickness of 0.5mm, stamped and stacked. The maximum field gradient for the QF and QD is about 10 T/m for 1.2 GeV operation. This requires

a excitation current of 650 A. The maximum field gradient for QC is about 12 T/m requiring 750 A. The coil for each pole of all quadrupole magnets consists of 16 turn copper hollow conductors whose cross section size is $12 \times 12 \text{ mm}^2$ with hole diameter of 5mm. All of the coils are cooled by water with a flow capacity of 10 l/min. The temperature of cooling water increases about 5.5°C in QF or QD, and about 9.6°C in QC. The quadrupole magnets can be split as up and down two parts for installation of vacuum chambers.

Fig. 8 shows the cross section of the QC magnet. Its length is 400mm and its bore radius is 50mm. The pole has a width of 100mm at its tip with about 10° angle taper to the pole root. The taper succeeds in averting the field saturation in the iron. In order to improve the uniformity of the quadrupole field gradient, we added a shim at each side-corner of the poles. Fig. 9 shows the geometrical configuration used in the POISSON to analyze the magnetic field distribution of QC. In the figure, ABCD is a hyperbolic curve which satisfies the formula of $xy=R^2/2$ where $R=50$ mm is the pole radius. In the case of shimming, BC' and C'D' are set as straight lines where C'D' with length of 5.335mm is parallel to the horizontal axis. The projection length of BC' on the horizontal axis is 5mm. The shim height of dy is supposed as the difference of vertical axis values between the point D on the hyperbolic curve and D'. Fig. 10 shows the deviation of the field gradient of QC for different shim heights. We notice that the field gradient is uniform in the range of 40mm from the center of poles within 10^{-3} in all of the cases, which satisfy the requirement of the design specification. Particularly, in the case of $dy=0.2\text{mm}$, QC has the widest uniform range of field gradient. Therefore, we chose the shim height of 0.2 mm for the quadrupole magnets. In practice, the shims can improve the fabrication precision, because the shim planes make the poles conveniently mounted and aligned.

The quadrupole magnets of QF and QD have same geometrical configuration which is illustrated in Fig. 11. The pole length and bore radius of them are 300mm and 50mm, respectively. The pole width is 140mm. Different from QC, no taper is added on poles because the fields do not saturate at the maximum field gradient required in QF and QD.

Similar to QC, a shim is added at each side corner of the poles of QF and QD to improve the uniformity of the field gradient. As shown in Fig. 11, AB is a hyperbolic curve; BC' and C'D' are straight lines. C'D' is parallel to the horizontal axis and the distance between

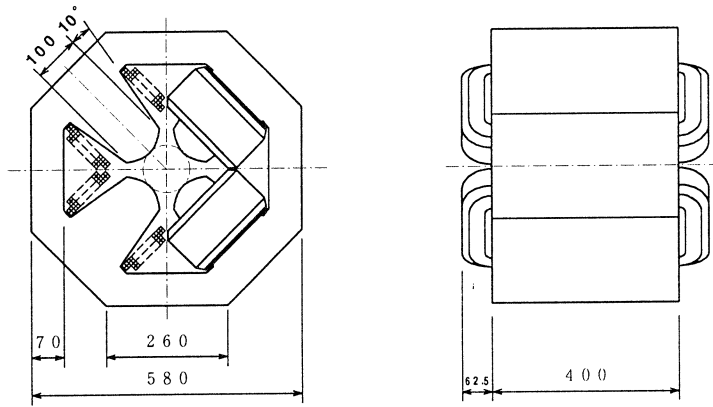


Fig. 8 . Cross section of the quadrupole magnet (QC).

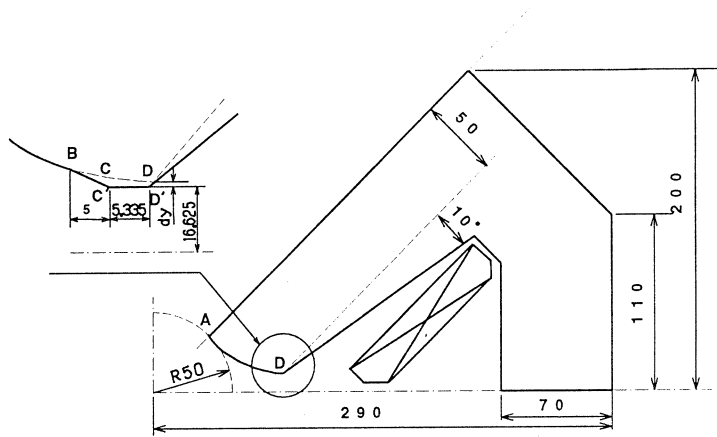


Fig. 9 . Geometrical configuration of QC for the simulation of field distribution.

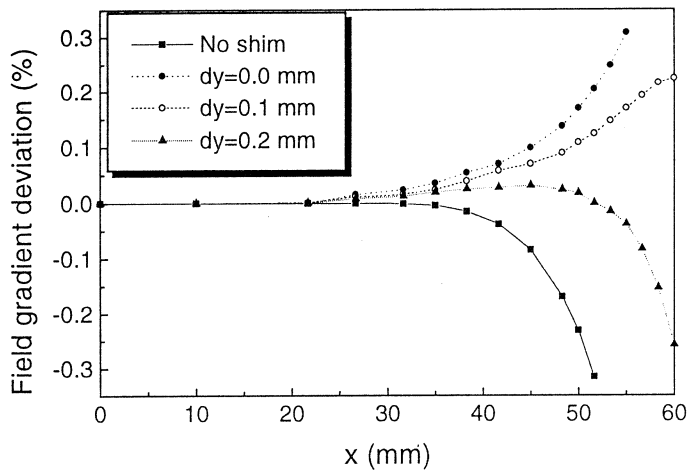


Fig. 10. Deviation of field gradient for shimming for the quadrupole magnet (QC).

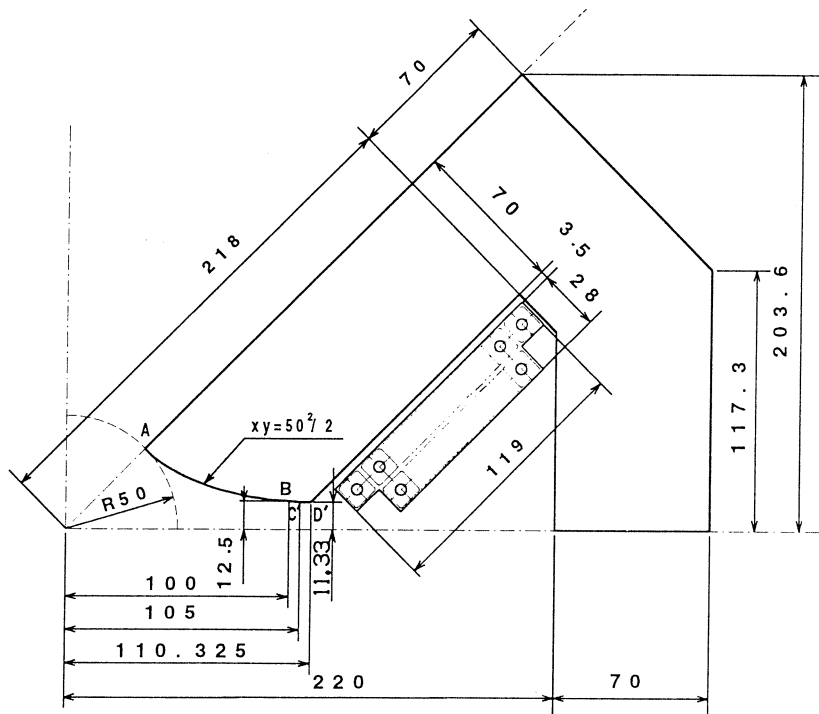


Fig. 11. Geometrical configuration of the quadrupole magnets (QF and QD).

them is 11.33mm. According to the simulation, when the current of coils is 650 A, the field gradient reaches to about 10.2 T/m. The homogeneity of the field gradient is also within 10^3 in the range of 40mm from the center of the poles.

§ 4. Septum Magnet

The septum magnet is an element that produces strong dipole field inside the magnetic pole space and a nearly field-free region outside the septum. There are three types of septum magnets used in the STB ring for different purposes. A direct current septum (SMIDC) and a pulsed current septum (SMIPC) are used in the beam injection system; a direct current septum (SME) is used in the extraction system. The design parameters for the septum magnets are shown in Table II. As these magnets have no enough space to install beam pipes in the field area, they are mounted in vacuum vessels. All of them are cooled by water.

Fig. 12 represents the geometric configuration of SMIDC for the field simulation. Apart

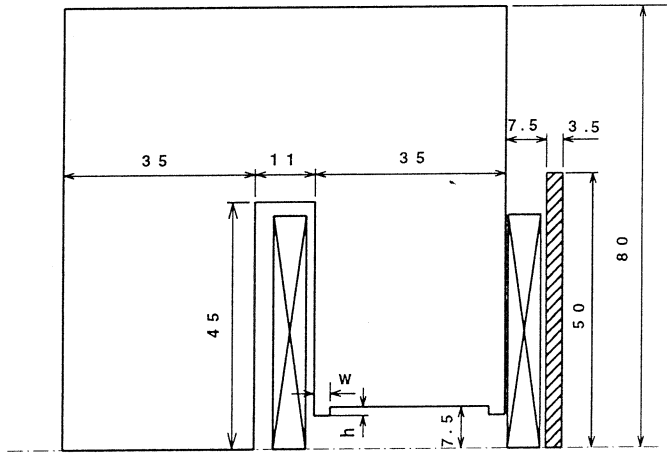


Fig. 12. Geometrical configuration of the injection septum magnet (SMI).

from the ideal design, the septum coils were attached outside the pole, because required ampere-turn is very large. The septum coil consists of eight turns of $7 \times 10 \text{ mm}^2$ hollow conductor. A 3.5mm thick silicon steel was attached outside the septum coil to clamp the tail of field. A field of 0.38 T is produced in the central region of the poles with 600 A current in each coil. Fig. 13 shows calculation results of the magnetic field strength in the SMIDC. As seen in the figure, the field is divided to low and high field regions by the septum. In the outside of the septum the field strength is largely suppressed to field-free. The flux density is lower than 40 Gauss at 10mm from the field clamp.

Table II. The design parameters of the septa in STB ring.

Characteristics	SMI (DC)	SMI (Pulse)	SME (DC)
Deflection	15.4°	2.6°	10°
Pole length [mm]	700	240	1500
Pole width [mm]	35	25	40
Pole gap [mm]	15	15	20
Septum thickness [mm]	7	2	7
Field clamp thickness [mm]	3.5	0.35	3.5
Field strength at 1.2 Gev [T]	0.384	0.19	0.457
Turns of coil	8	1	8
Current [A]	600	136	923
Voltage [V]	5.7	36	14.5
Fringing field at 10 mm [G]	<50	<50(at 5mm)	<50

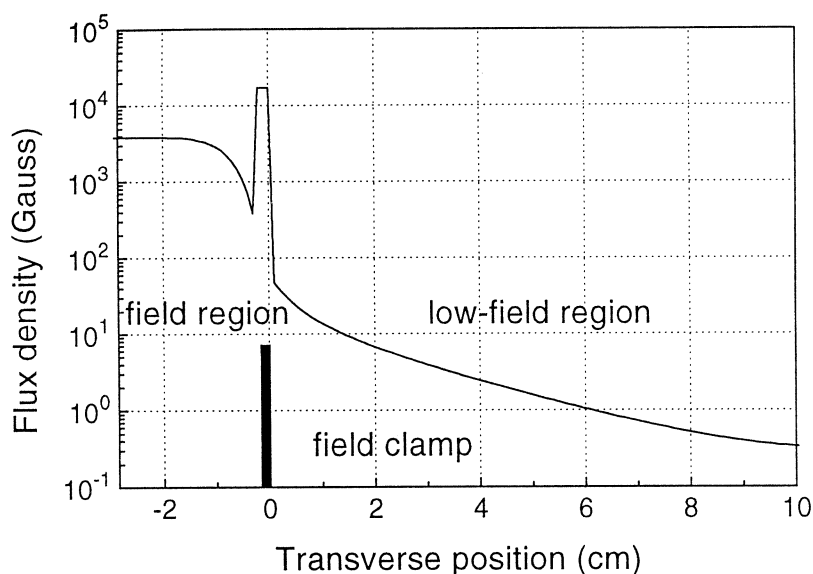


Fig. 13. Calculated magnetic fields of the septum magnet (SMI).

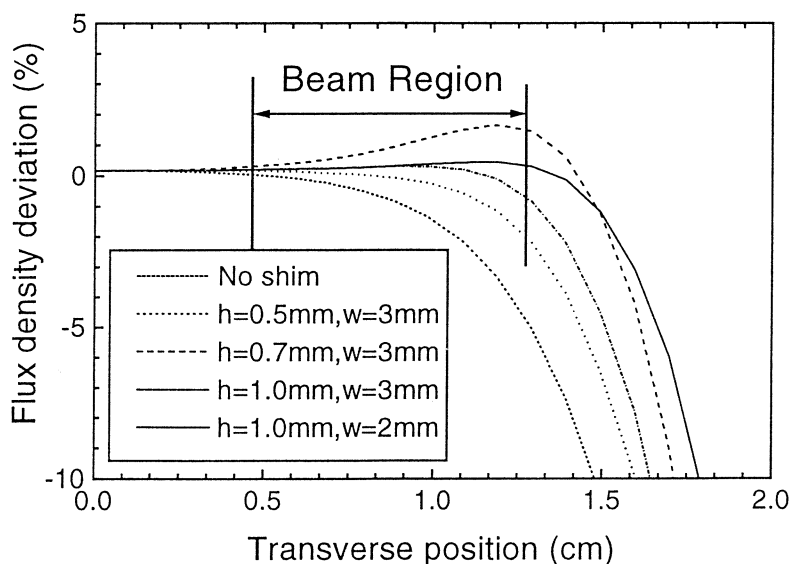


Fig. 14. Deviation of flux density and for shimming of the septum magnet (SMI).

Similar to the quadrupole magnets, we also added shims on the two sides of the pole ends shown in Fig. 12. These shims improved the field uniformity in the beam transporting region. We compared the field distribution for shims with different width and height. They are shown in Fig. 14, where the origin of the coordinate system is located at the

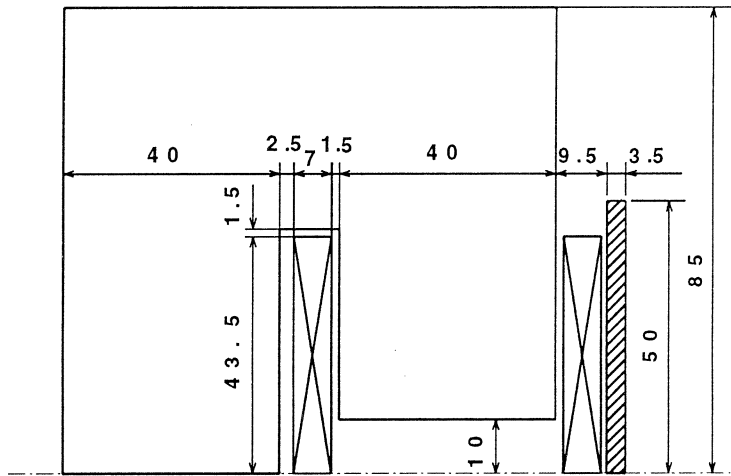


Fig. 15. Geometrical configuration of the extraction septum magnet (SME).

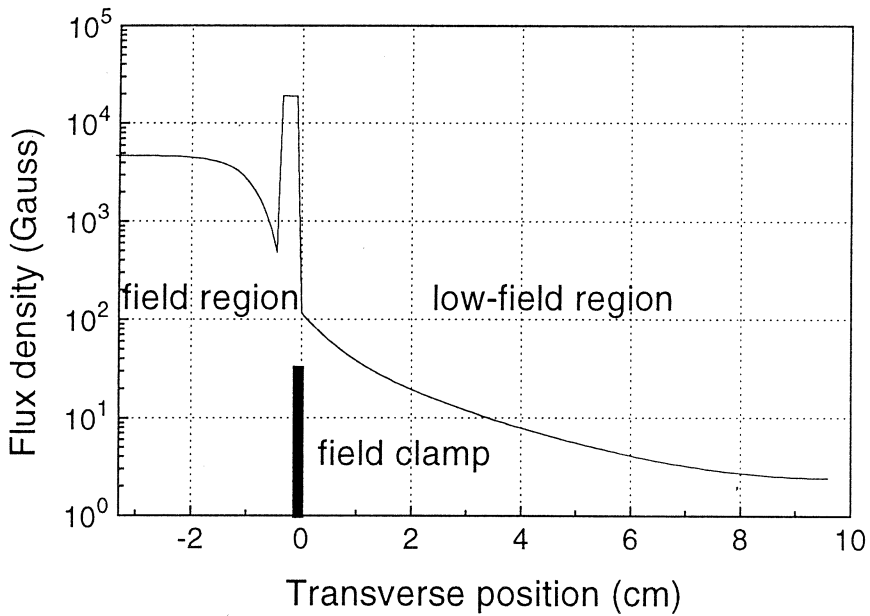


Fig. 16. Calculated magnetic fields of the septum magnet (SME).

center of the poles. In the case of shims of 1 mm-high and 2-mm wide, the change of the field is less than 1 percent in the beam region, and it is suitable to our design of the septum magnet.

Fig. 15 shows the geometrical configuration of SME. Similar to SMIDC, the septum coils in SME were attached outside the pole and a 3.5mm thick silicon steel was located outside

the septum coil to clamp the field. However, no shims are used in this magnet. In addition, its pole width of 40mm and gap of 20mm are different with those of SMIDC. Fig. 16 shows calculated magnetic fields of SME. It produces a field of 0.469 T in the central region of the poles with a current of 940 A in each coil. The flux density is suppressed to lower than 40 Gauss at 10mm from the field clamp.

Acknowledgments

The authors would like to thank for the other member of the STB research and construction group for their useful suggestion and support. This work was supported by the Foundation of Science Research from the Ministry of Education, Japan. One of the authors also would like to appreciate the Japan Society for the Promotion of Science for their support.

References

- 1) M. Oyamada: *Proc. 9th Symp. On Acc. Sci. and Tech.* (Tsukuba, Japan, 1993) p. 486.
- 2) M. Oyamada: *Proc. 10th Symp. On Acc. Sci. and Tech.* (Hitachinaka, Japan, 1995) p. 463.
- 3) S. Sato *et al.*: *SR Sci. and Tech. Inf.* **6** (1996) 34.
- 4) K. Halbach *et al.*: *Particle Accelerators.* **7** (1976) 213.

ストレッチャー・ブースタリングの精密アラインメント

核理研

井上 隆・中里俊晴・小山田正幸
封 碧波・浦澤茂一・玉江忠明
高橋重伸・内田智久・渡辺勝美

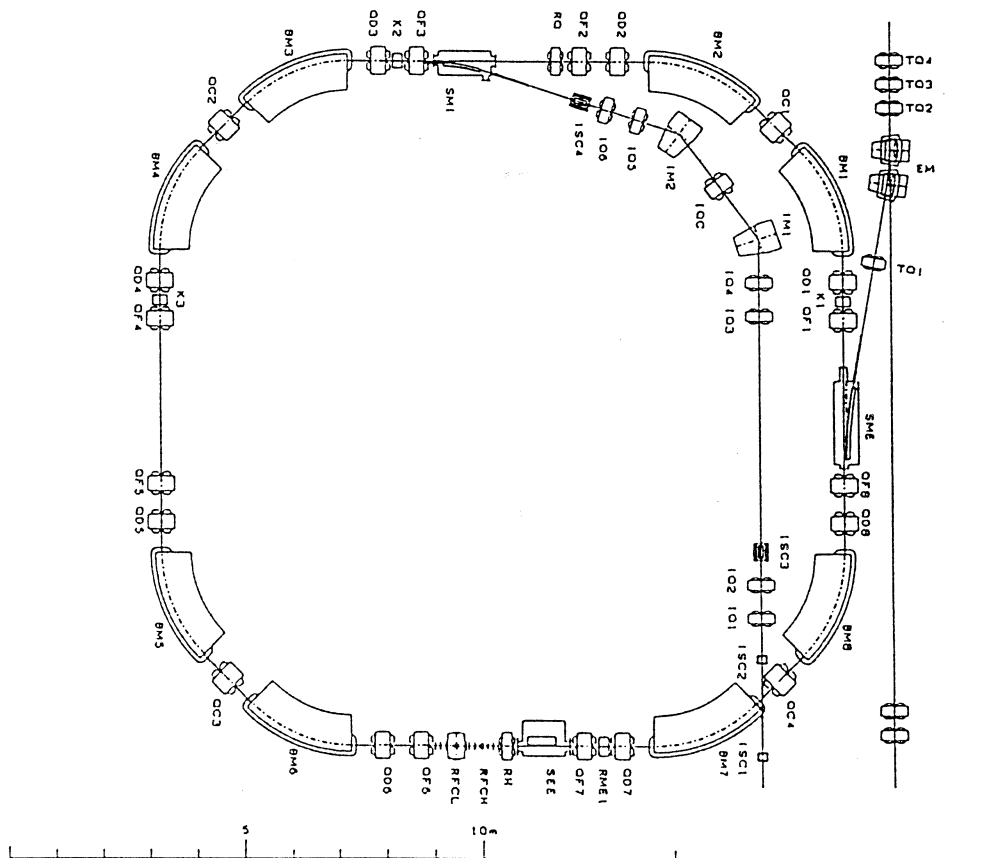
§ 1. 序 論

東北大学理学部附属原子核理学研究施設（核理研）では、ストレッチャー・ブースタリング（以後 STB リング）の建設が行われている。STB リングは、ライナックから来る250MeV のパルスビームを直流化して取り出し、連続ビームによる原子核実験を可能にするストレッチャーとしての機能、取り込んだビームをリング内に保ち、1.2GeV まで加速して内部標的による原子核実験を可能にする蓄積リングとしての機能、そして将来建設が予定されている放射光リングへ1.2GeV に加速したビームを打ち込むためのブースターとしての機能を目的として設計された。リングの外形を第1図に示す。

ストレッチャーモードでは、ビームの入射と取り出しを3.3m sec の周期で効率良く繰り返さなければならない。また内部標的実験や標識付光子実験を行う為にはビームサイズを小さく抑えることや、ビームのエネルギー分散を整える必要がある。このようなことから、リング内を運動する粒子軌道を的確に制御しビームの安定性を確保することが重要となる。

加速器の理想的な軌道は偏向電磁石の配置から決定されるもので、偏向部では設計された曲率半径で円弧を描きそれ以外では直進するといった軌道である。これが設計軌道である。一方、実際の加速器内では粒子が集団で加速されており、粒子集団はその重心を中心軌道（全て四極電磁石の中心を通る軌道）に一致させ回っている。この粒子集団の重心位置は運動方程式を解くとリング一周に対して周期解になっており、中心軌道は閉軌道となっている。

設計通りに電磁石が配置していないと閉軌道（中心軌道）が設計軌道に対してずれてしまう。この閉軌道の歪みが C. O. D. (closed orbit distortion) である。C. O. D. の量が大きければビームの寿命が減ったり、ダクトの内壁にぶつかってビームが失われてしまう。これは加速器の機能にとって致命的な欠陥となる。この為加速器の建設段階で電磁石を設計位置に設置することが重要である。STB リングは前記した機能が充分達成されるよう設計されており、設計値から見積もることのできる C. O. D. の許容値を満たすようにアラインメントを行えば良い。



第1図 ストレッチャー・ブースタリングの構成。

リングの構成は四回対称で偏向電磁石8台、四極電磁石20台からなる。図中のBMの記号が偏向電磁石を、QC, QF, QDの記号が四極電磁石を表す。

本研究はリングの主な構成要素であり、粒子の中心軌道に大きな影響を持つ四極電磁石と偏向電磁石について、許容設置誤差を曲線座標系での変位置で $100\mu m$ とし、精密アライメントを行い邪魔なC. O. D. を最小限にすることを目的とした。

この為には精度良い測量と補正が必要である。加速器のアライメントには既に数多くの報告がなされているが、何れも高価な測量機器や可動架台など大掛かりなシステムによるものである。核理研では経済的、時間的な制約からこれらの方法を用いることはできない。以上のことより本研究では高価な機器を使用せず高精度かつ容易な測量方法、アライメント方法を方針とした。

§ 2. C. O. D. の理論

C. O. D. を解析的に説明しそれと関連づけて電磁石許容設置誤差の妥当性を検討する。加速器内を周回運動する一粒子に着目し、その運動方程式を考えると、

$$x''(s) + \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{e}{p} \left(\frac{dB_y}{dx} \right) \right) x(s) = -\frac{e\Delta B_{0y}}{p} \quad (x \text{ 方向}) \quad (1)$$

$$y''(s) - \frac{e}{p} \left(\frac{dB_y}{dx} \right) y(s) = \frac{e\Delta B_{0x}}{p} \quad (y \text{ 方向}) \quad (2)$$

となる。ここで、 x, y, s は曲線座標系での粒子位置、プライム記号は s での微分、 ρ は曲率半径、 e は電荷、 p は運動量、 B_x, B_y は磁場の x, y 成分、 $\Delta B_{0x}, \Delta B_{0y}$ は偏向磁場誤差の x, y 成分を表わす。また、 $x, y, \Delta B_{0x}, \Delta B_{0y}$ は微少量として2次以上の項は無視した。上式の右辺が磁場誤差がある場合の摂動項に対応する。この運動方程式を x, y についてまとめて解くと、

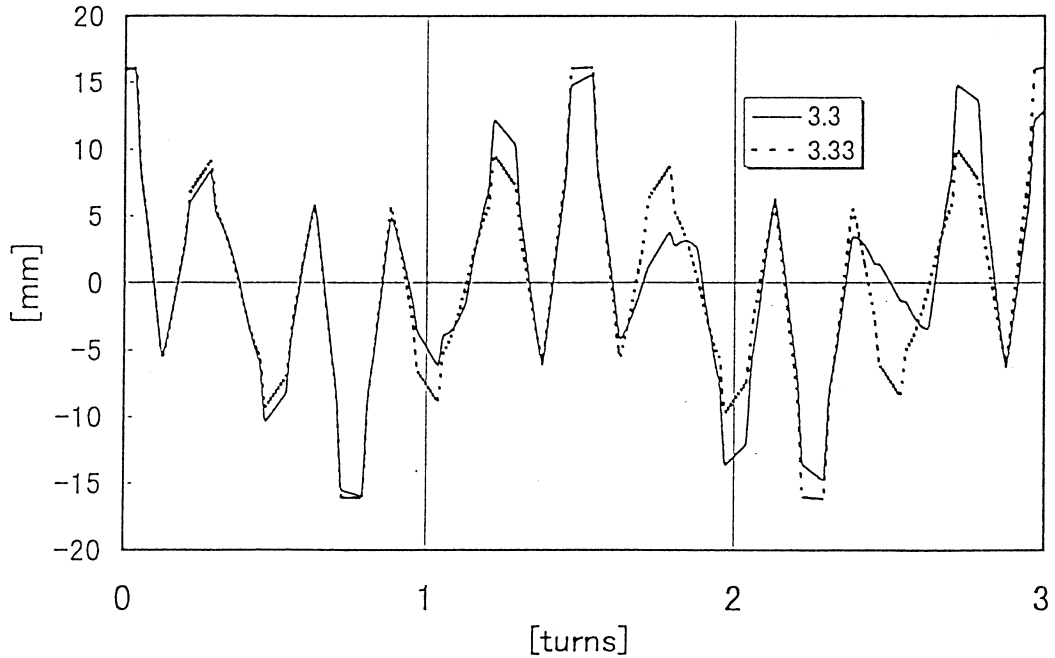
$$\begin{aligned} u(s) &= \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\nu(\varphi(s) - \varphi_0)) \\ &+ \frac{\sqrt{\beta(s)}}{2 \sin \nu\pi} \int_s^{s+C} \sqrt{\beta(\sigma)} p(x, y, \sigma) \cos(\nu(\varphi(\sigma) + \pi - \varphi(s))) d\sigma \\ &\equiv u_\beta(s) + u_{COD}(s) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで、 u は x, y を代表させた記号。第1項は摂動が零の場合の一般解であり、 ε と φ_0 が初期条件によって決定される未知定数である。また $\beta(s)$ はベータatron関数、 ν はベータatron振動数 (チューン数)、 $\varphi(s)$ はチューンによって規格化された位相、 $p(x, y, \sigma)$ は x, y 方向の摂動を代表させた記号である。粒子はこの項に従って振動を行う (ベータatron振動)。その様子を x 方向についてリング3周期分について表わすと第2図のようになる。この図のように粒子は x 方向では3周後にほとんど同じ位置と傾きを持つことがわかる。第2項は摂動が有限の大きさを持っている場合に周期解であると言う拘束条件を課して導出した特殊解である。これは振動中心のズレ、つまり C. O. D. に対応する。尚、摂動項をミスアライメントと関連づけて表現すると、

$$p(x, y, s) = \begin{cases} -\frac{e}{p} (\Delta B_{0y}) = k_0 \Delta x & (x \text{ 方向, リング外側が正}) \\ \frac{e}{p} (\Delta B_{0x}) = -k_0 \Delta y & (y \text{ 方向, 上方が正}) \end{cases} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\Delta x, \Delta y$ は曲線座標系での四極電磁石の中心位置の変位置、 k_0 は四極磁場成分である。この式より $\Delta x, \Delta y$ の絶対値が増加すれば $p(x, y, s)$ の絶対値も増加しそれに伴い、

C. O. D. が大きくなる関係を示している。つまりミスアラインメントの量が C. O. D. の大小を決定することとなる。尚、y 方向に関しては偏向電磁石の回転誤差も摂動になりえるが微量である為無視した。



第2図 リング3ターンにわたる粒子軌道

粒子は場所により位相変化率と振幅を変え3ターンでほとんど同じ場所に戻る。最大振幅は16mmである。横軸はビーム進行方向位置を表わす。始点はQF1上流の直線部の中点、初期位相は零、エミッタンス ϵ_x は12.6mm mradを仮定した。図中の実線がチューン数3.3の時、点線はチューン数3.33の時の様子である。

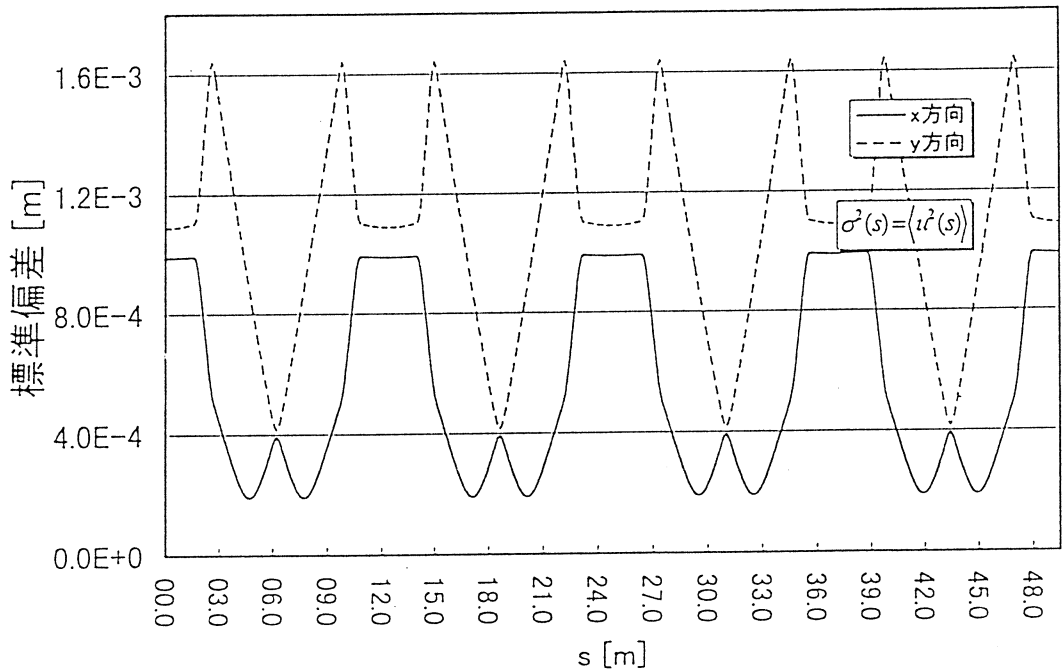
初期アラインメントを行う前に、電磁石の許容設置誤差を決定する必要がある。ここでは、設置誤差に目安の値として $100\mu\text{m}$ を代入し、C. O. D. の量を見積もり、許容量の妥当性を検討した。全ての四極電磁石が $100\mu\text{m}$ ズレており、その方向に自由度を持たせると、C. O. D. の分散は

$$\langle u^2(s) \rangle = \frac{\beta(s)}{8 \sin^2 \nu\pi} \sum_{i=1}^n p_{0i}^2 \beta_i l_i^2 \quad (5)$$

と近似できる¹⁾。ここで、 n は摂動の総数、各記号についた添え字 i は局地的に存在する摂動の番号、 l_{0i} は i 番目の摂動領域を表わす。この式の平方根は標準偏差 $+\sigma(S)$ に対応するもので、第3図に示すような形になる。C. O. D. は電磁石のズレの方向によって様々な軌道を描

くが、68.2%の確率で $\pm\sigma(S)$ の領域内に分布する。この図よりリング加速器の直線部では x 方向で0.98mm, y 方向で1.64mm の標準偏差を示していることがわかる。STB リングでは先にみたように粒子が3周後ほとんど同じ位置に戻る。よって一度入った粒子が3周後に入射用セプトム電磁石にぶつからないようにする為 x 方向で C. O. D. を $\pm 4.00\text{mm}$ 程度に抑えることが必要とされている。 y 方向についてははっきりと許容量を決定されていないが、 x 方向と同等かそれ以上の値で良いとされている。この計算結果から許容設置誤差 $100\ \mu\text{m}$ のアラインメントによって、C. O. D. が十分に抑えられることが判明した。また $100\ \mu\text{m}$ のアラインメントは実現の可能性を持った妥当な値である。

以上の理由から、本研究のアラインメントの許容設置誤差は $100\ \mu\text{m}$ とする方針をたてた。



第3図 設置誤差 $100\ \mu\text{m}$ での C. O. D. の標準偏差。

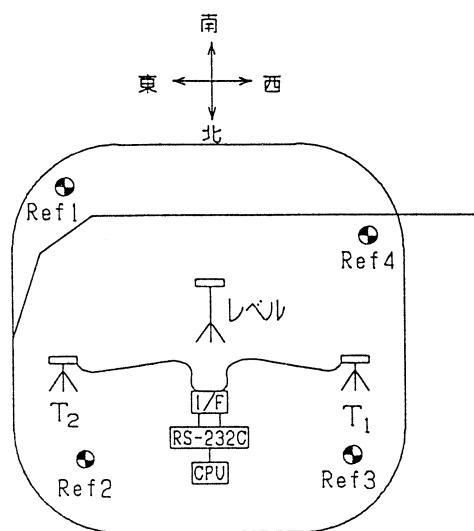
設置誤差 $100\ \mu\text{m}$ で全ての四極電磁石が上下左右ランダムにずれている場合に示す C. O. D. の標準偏差をリング一周にわたって表わす。実線は x 方向、破線は y 方向のものである。横軸はリング一周にわたる位置を表わす。始点は QF 1 上流の直線部の中点である。

§ 3. 測量機器とアラインメント方法

アラインメントの具体的な方法を測量を中心に紹介する。測量機器の配置図を第4図に示す。

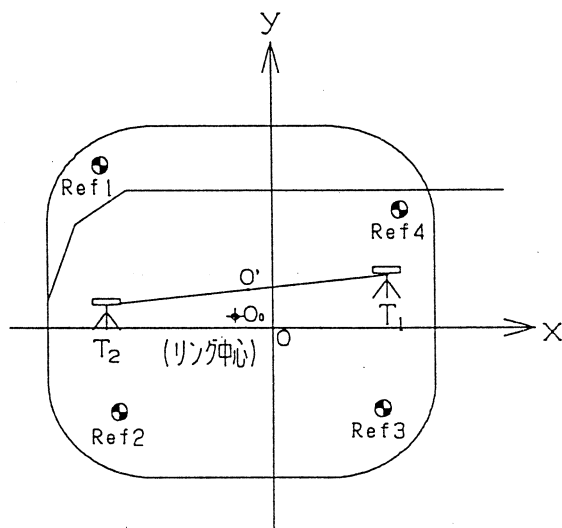
ここで、 T_1 、 T_2 はライカ社製のT2002セオドライト。Ref1～Ref4は測量基準点を表わす。本測量ではアラインメント作業に先立ち、測量基準点を厳密に測量し誤差の無い真値として取り扱った。またこの4点は作業期間中設置固定した。長時間セオドライトを安定に固定する為強固な測量機器用架台を使用した。標的はテーラーホブソン社製の円盤状に加工されたターゲットを口の開いた球形のホルダーに取り付けたものである。

STBリングの電磁石は上面にアラインメント用の基準面及び基準穴を備えている。基準穴は基準面上に掘りぬかれた穴であり、ここに、標的を乗せるための測量用台座（以後カップと呼ぶ）を取り付ける。カップは標的中心が動かないように再現設置できるよう工作精度 $10\mu m$ で製作した。



第4図 測量機器とリングとの位置関係。

リングに対しセオドライト及び、測量基準点を図のように配置した。 T_1 、 T_2 セオドライト、Ref1～Ref4は測量基準点を表わす。測量基準点には円柱が設置されておりビームライン(1600mm)の位置にターゲットが置けるようにしてある。



第5図 原点の関係。

測量時の原点は O' 、測量基準点から形成される原点は O である。 O によって作られる座標系は測量期間中不変である。リング中心は O_0 である。

セオドライトからの角度の測量データはインターフェイス (I/F)、RS232Cを経由してノート型パソコンに送り収集した。ここで、1回の測定中セオドライトを正位、及び反位の状態にして目標を視準し各3回データを送信している。1回の測量に対してそれぞれのセオドライトの水平角、垂直角のデータを1組分として、合計6組のデータが送信される。

また各測量ではセオドライト間の距離を精密に決定する為スケールバーを同時に測量した。
またリングのほぼ中央に高さを測量するためのレベルを設置した。

アラインメントは水平2次元についてはセオドライト三角測量，鉛直方向についてはレベル測量のデータに基づき行った。尚，セオドライト三角測量ではデータ処理が必要である。セオドライト三角測量の測角データは，リング四分の一のデータ点群とリング中心 O_0 を決定する為のデータ点群に分けられる。ここで，各点群の測量時の原点 O' は第5図に示すようにセオドライト間の中点である。セオドライト架台は測量上の都合から頻繁にその位置を変えたのでそれに伴い原点の位置も変わる。一方測量基準点から形成される原点 O は空間内に固定されている。各測量では電磁石測量点群のほかに測量基準点も同時に視準しているので，原点 O' を原点 O に重ねることによって，点群をつなぎ合わせることが可能である。これらの手順に従いデータ処理を行った。個々の処理内容は

- 1) 分散による加重平均
- 2) 水平角零点方向の修正
- 3) 測量時原点の導出

に大別して表わすことができる。ここで，1)はセオドライトの正位，反位の測量から分散を求め複数回測量した同一点に関しては分散値を考慮に入れた加重平均をとることを意味する。分散値はその平均を機械精度によるオフセット値として差し引いた後，平均からのズレが1.5秒以内に収まるよう測量した。また分散が大きいものに対しては，何度も測量しデータの信頼性の向上に努めた。

次に2)について説明を加える。測量時のセオドライトと標的点との位置関係は第6図のようになる。ここで，セオドライトの垂直角零点方向は内蔵されている自動2軸補償装置より，精度良く鉛直軸をさしているが水平角零点方向は各セオドライトによって別々の方向を示しており測量からこの方向を厳密に求めることはできない。しかし三角測量によって標的点の3次元座標位置を求めるためには空間内に三角形を形成しなければならない。これは水平角零点方向を揃えることに相当する。ここでは第7図のような三角形を想定し正弦定理による拘束条件を課しデータの修正をおこなった。正弦定理から評価関数を作ると，

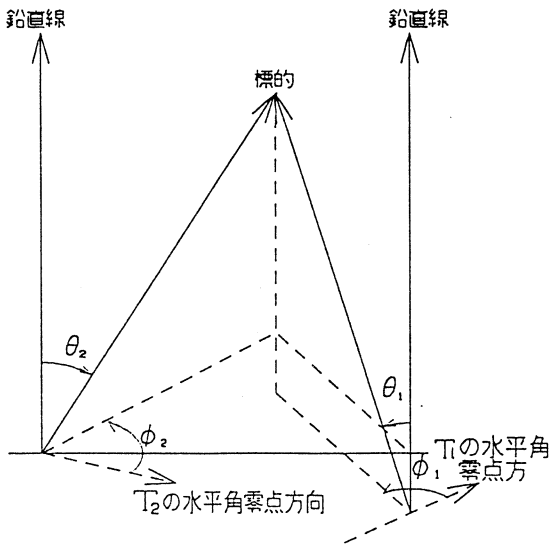
$$\frac{\sin \varphi_1}{\tan \theta_2} - \frac{\sin \varphi_2}{\tan \theta_1} + \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \tan \theta_3 = F(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \varphi_1, \varphi_2) \quad (6)$$

となる。ここで各角度は第7図のように定義した。評価関数 F の絶対値が小さい程真値に近いという性質もっている。これらの測角データには零点方向のズレが一律に含まれていると

考えて、

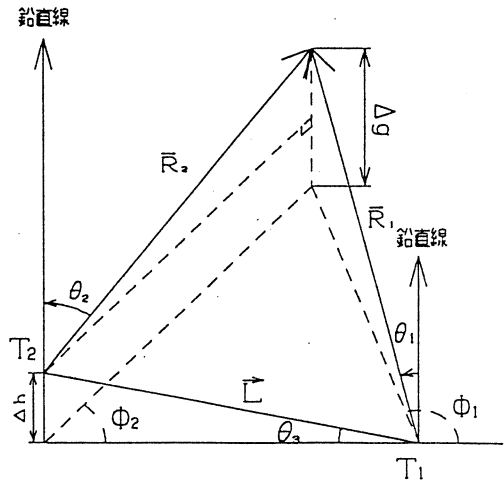
$$\begin{cases} \varphi_{o1i} = \varphi_{a1i} + d\varphi_1 \\ \varphi_{o2i} = \varphi_{a2i} + d\varphi_2 \\ \theta_{o1i} = \theta_{a1i} + d\theta_1 \\ \theta_{o2i} = \theta_{a2i} + d\theta_2 \\ \theta_{o3i} = \theta_{a3i} + d\theta_3 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

と表わせる。ここで添え字 o は測量角度、 a は修正角度を表わす。また n は測量点の総数、 $d\theta_1, d\theta_2, d\theta_3, d\varphi_1, d\varphi_2$ は修正値を表わす。ここでは、修正角度を代入した評価関数の絶対値が最小になるような修正値の組み合わせを最小二乗法で導出した。



第6図 水平角零点方向の関係。

測量時にはセオドライトの水平角零点方向はお互いにバラバラの方向を向いており、測量によってこれを認識することはできない。



第7図 目標点との理想的位置関係。

2台セオドライトが誤差を含まずに目標を視準した時、図のように空間内に三角形を形成する。 θ_3 はセオドライトの高さの違いから生ずる角度である。

3) については、測量基準点を測量することによって厳密にセオドライトの位置を求め、それから原点を導出するという方法をとった。点 Ref 1 と点 Ref 2 と、その間の開き角を基にセオドライトを通る外接円を求める。このような外接円は点 Ref 2 と点 Ref 3 によっても求まる。セオドライトの位置はこのような 2 外接円の交点として導出することができる。この位置は測

量基準点中の任意の3点によって導出できるので、合計4種類の位置が求まる。測量基準点の値が真値ならば4種類の位置は同一点上に重なる。しかし、値に誤差が含まれているので4つの位置にはばらつきがある。ここでは4つの位置の重心位置をセオドライトの位置とした。このようにして2台のセオドライトの位置を決定できればその中点として原点 O' が求まる。以上の方法で各測量点群をつなぎ合わせ、最終的にリング中央 O_0 を基準とした座標系で全電磁石の測量位置を導出した。

STBリングの電磁石には鉛直および水平方向の調整用ボルトが取り付けられている。このようなボルトは偏向電磁石には計14個、四極電磁石には計11個ついている。電磁石の補正はこれらのボルトを用いて行った。

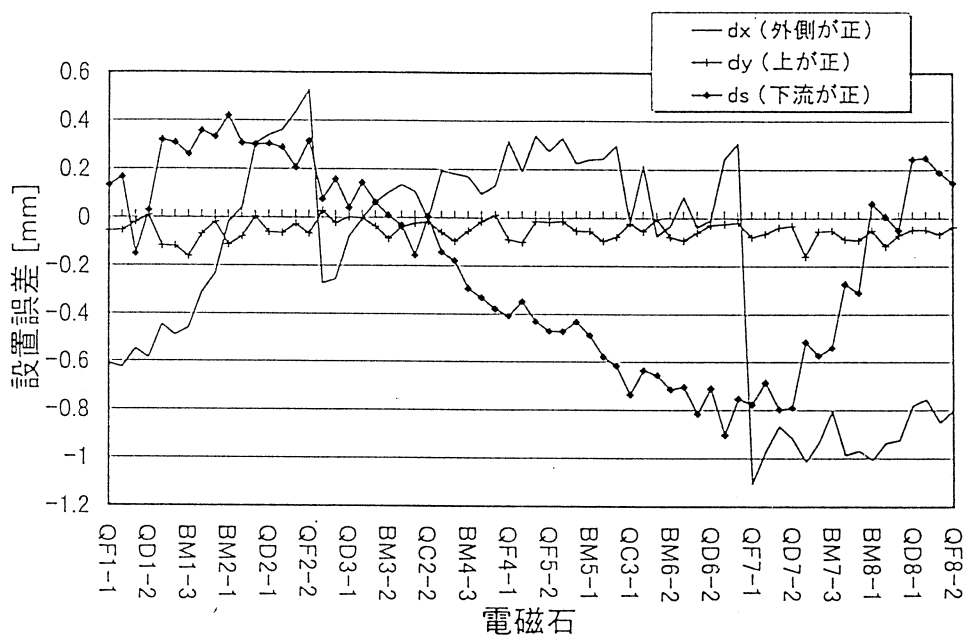
§ 4. 測量結果及び考察

4.1 結果

本研究グループが、アラインメント作業を開始したのはメーカーが許容誤差1mmで、粗アラインメントを行った後の平成8年8月20日である。アラインメント作業と並行して、偏向電磁石BM4とBM5の入れ替え作業、全4極電磁石にスペーサーの取り付け作業、4極電磁石QF1, QF4, QC1, QC4の架台調整作業がはいった。アラインメント作業が全電磁石に対して行える状況になったのが9月24日である。この間、可能なものに対しては部分的な測量のみから算出した電磁石配置を基にアラインメントを行った。全電磁石の第1回目のアラインメントを終えたのが9月26日である。第3章で述べた測量の為の基本グループを形成してセオドライト三角測量を行ったのが、9月28日でありその時の電磁石の配置図を序論で述べた曲線座標系で表わしたのが第8図である。これから、 y 方向（曲線座標系で高さ方向）に関しては相対的に $\pm 100\mu\text{m}$ の範囲で位置調整できたことがわかる。一方、 x, s 方向は $+0.6\text{mm}$ から -1mm の範囲で位置がばらついている。この理由は、 y 方向はレベルを用いた測量データから補正值を算出しているのに対し、 s, x 方向の補正值は部分的なセオドライト三角測量から導かれていることが考えられる。

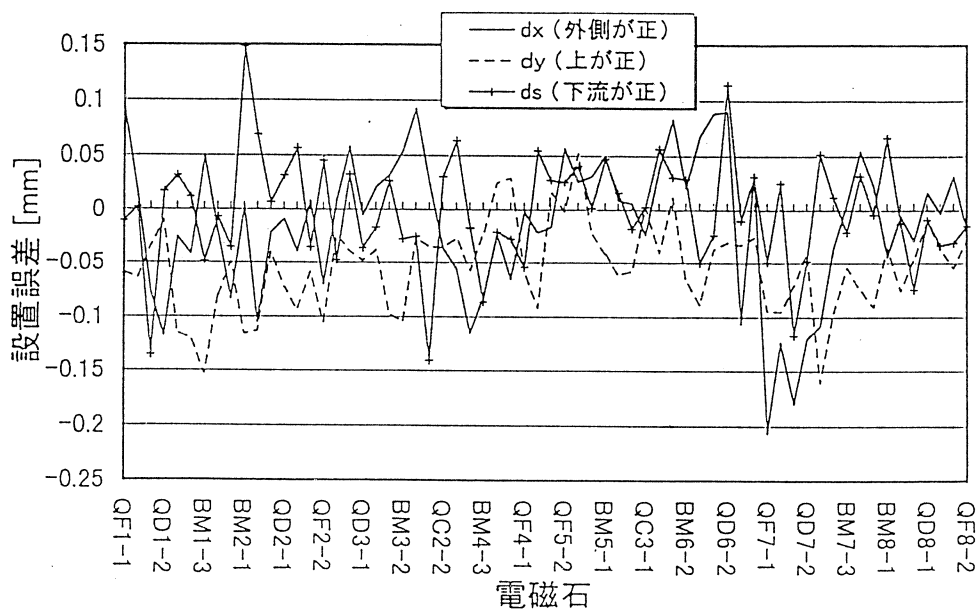
第2回目アラインメント作業が完了したのは9月30日。測量が終了したのは10月3日である。この図を第9図に示す。これより、電磁石の設置誤差はいくつかの電磁石を除いて $\pm 150\mu\text{m}$ の範囲内に並べられたことがわかる。この図より電磁石設置誤差が格段に収束したことがわかる。この結果は第1回目の測量結果及び補正作業の正当性を示唆するものである。

第3回目アラインメント作業が完了したのは10月5日。測量が終了したのは10月6日である。



第8図 第1回調整後の電磁石測量結果。

電磁石設置誤差を曲線座標系で表わしている。横軸は電磁石であり、ハイフン記号の後の数字は測量穴の番号を表わす。測量穴の番号は各電磁石に対しビーム上流から1, 2, …の順でつけた。



第9図 第2回調整後の電磁石測量結果。

電磁石設置誤差を曲線座標系で表わしている。横軸は電磁石であり、ハイフン記号の後の数字は測量穴の番号を表わす。

この結果を第10図に示す。この図よりいくつかの電磁石を除き目標の許容誤差 $\pm 100 \mu\text{m}$ の範囲で並べられたことがわかる。

また、この時の電磁石の配置状況をレベルによって測量した結果を第11図に示す。電磁石測量64点中、55点が $40 \mu\text{m}$ の精度で合致している。このことより、セオドライト三角測量とレベル測量は極めて良く整合していると言える。

この時の電磁石のビーム進行方向に対する回転誤差を第12図に示す。符号はビームの上流から見て反時計回り、即ちリングの外側が上がる方向を正とした。これより、QF7電磁石と偏向電磁石を除いて目標値の $\pm 2 \text{ div}$ ($\pm 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$)を満たしていることがわかる。

4.2 考察

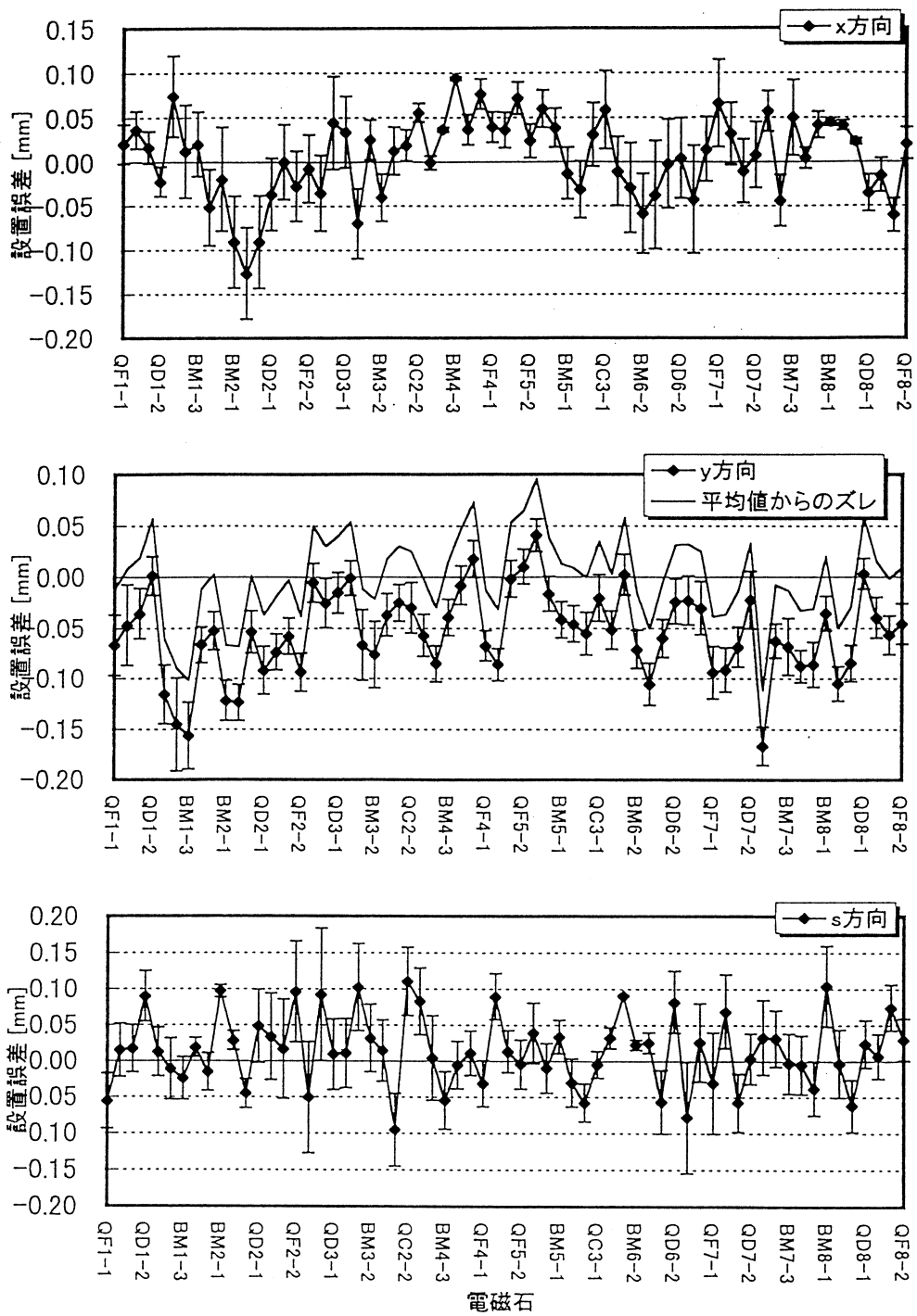
STBリングを構成している電磁石の測量点は合計64点である。

そのうち x 方向では63点、 y 方向では59点、 s 方向では62点が許容設置誤差内にはいつている。ここで行った y 方向の評価は設計ビームライン1600mmを基準とした値である。しかしリングの y 方向の中心位置(ビームライン)は微量であればビーム輸送路の下流を上下させてリングに接続することにより、変化させることができる。リングの y 方向の中心位置を測量値の平均値 -0.05507mm ずらすことを考えると、 y 方向の電磁石の設置誤差は改めて62点が許容設置誤差内に並べられたこととなる。以後この評価で電磁石の設置誤差を考える。

設置誤差量が大きいのでは x 方向ではBM2の -0.13mm が挙げられる。平均値は -0.00556mm で0に極めて近い。 y 方向ではBM7の -0.11mm である。 s 方向ではQC2の 0.11mm であり、平均値は -0.01449mm である。以上より、 s 方向を除いて全ての四極電磁石は許容誤差範囲内に設置できたこととなる。また第10図は偏向電磁石の方が四極電磁石より比較的設置誤差が大きい傾向を示している。この理由としては下記のことが考えられる。偏向電磁石は大量の鉄からなっており数ミクロンの微量調整に対しては外形が収縮する可能性がある。この結果調整の影響がでにくい。また大質量なので調整作業自体が困難になる(スパナを回している時、注意しないとダイヤルゲージにぶつかってしまう)。

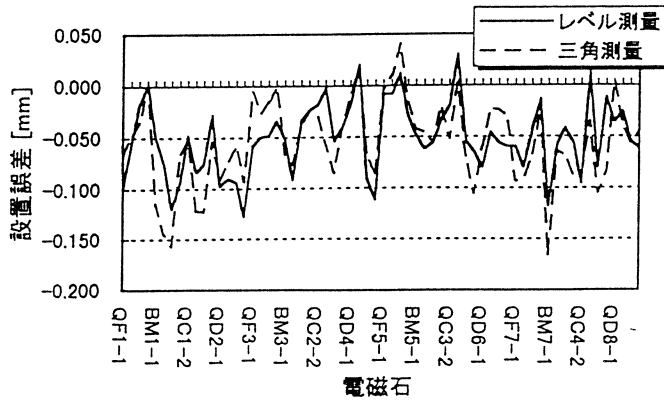
偏向電磁石の並進的な設置誤差がC. O. D.に与える影響は微量である。問題となるのは四極電磁石の x 、 y 方向設置誤差及び、偏向電磁石の回転誤差である。回転誤差によって生じる摂動は回転角 θ が小さいので、

$$\begin{cases} p_x = 0 & (x\text{方向}) \\ p_y = \frac{B_y \theta}{B_y \rho} = \frac{\theta}{\rho} & (y\text{方向}) \end{cases} \quad (8)$$

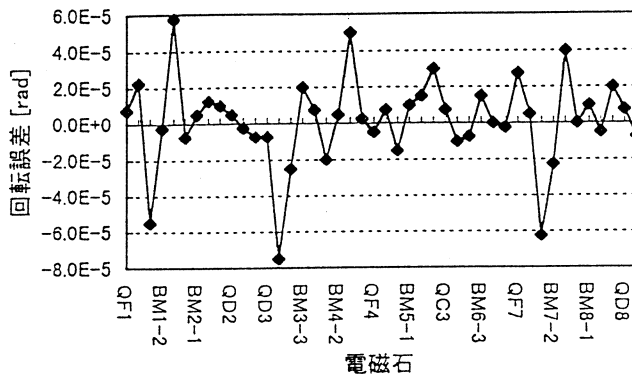


第10図 第3回調整後の電磁石測量結果。

電磁石設置誤差を曲線座標系で表わしている。横軸は電磁石であり、ハイフン記号の後の数字は測量穴の番号を表わす。y方向の実線は測量誤差の平均値を零とした場合の様子である。



第11図 セオドライト三角測量とレベル測量との関係。
セオドライト三角測量とレベル測量とのデータの比較した図。測量点64点中、55点が $40\mu\text{m}$ の精度で合致している。横軸は電磁石であり、ハイフン記号の後の数字は測量穴の番号を表わす。



第12図 電磁石の回転誤差。
ビーム上流からみて反時計まわりを正とした。横軸は電磁石であり、ハイフン記号の後の数字は測量穴の番号を表わす。

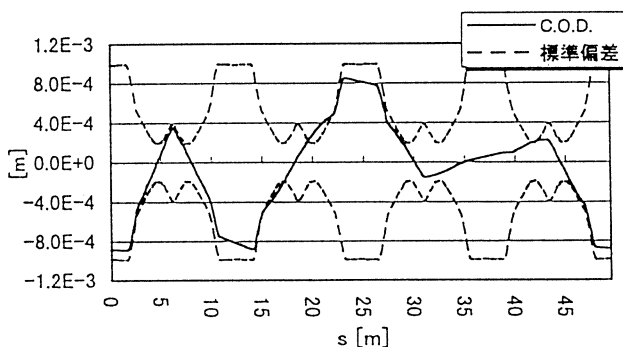
となる。(8)式の y 方向については、最大の偏向電磁石の回転角である BM 7 の 7.5×10^{-5} rad を代入すると、 2.5×10^{-5} rad/m である。一方四極電磁石の設置誤差 $100\mu\text{m}$ による摂動は約 $2.3 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ となり、回転誤差によるものより10倍程大きいことがわかる。摂動の量は電磁石の単位長での蹴り角に相当する。

偏向電磁石は四極電磁石と違い、長い領域で粒子に作用しているので 2.5×10^{-5} rad/m の摂動が全領域にあると偏向角（蹴り角）は無視できない値になる。しかし、第12図でみるように偏向電磁石は測量点の 1, 2, 3 番ピンで正負乱雑な値をしめしており、例外無くねじれた形

状を示している。よって総合的な偏向角は相殺する傾向があり、回転誤差による偏向角（蹴り角）が C. O. D. に与える影響は四極電磁石設置誤差よりも小さいと判断する。

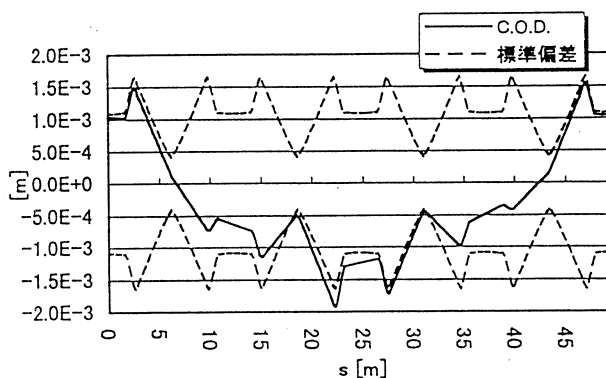
粒子軌道の運動方程式の摂動項を(4)式とし、測量結果から C. O. D. をシミュレートした。その図を x 方向に対して第13図、 y 方向に第14図に示す。図中の実線が C. O. D.、破線が C. O. D. の標準偏差を正負の領域に表わしたものである。この図より測量結果から求めた C. O. D. は許容量に収まっていることを確認した。また C. O. D. は一部を除き破線の中にも収まっている。この関係は一連の計算結果に矛盾がないことを示している。

実際の C. O. D. はリング運転中にボタン・モニターで測定される。しかし、事前に C. O. D.



第13図 測量結果から求めた C. O. D. (x 方向)。

横軸はリング一周にわたる位置を表わす。始点は QF 1 上流の直線部の中点、単位は m である。C. O. D. の最大値は 8.55×10^{-4} m、最小値は -8.93×10^{-4} m である。



第14図 測量結果から求めた C. O. D. (y 方向)。

横軸はリング一周にわたる位置を表わす。始点は QF 1 上流の直線部の中点、単位は m である。C. O. D. の最大値は 1.55×10^{-3} m、最小値は -1.94×10^{-3} m である。

を予知することは電磁石配置状況を検討する上で重要である。本研究でのシミュレーション結果はその作業を助けるものである。また C. O. D. の実測値がここで示したシミュレーション結果と整合するものであれば、第10図の最終的な測量結果の正当性を強く示唆することとなる。そしてこれらは今後のアライメントにおいて重要な基礎データとなる。本研究のアライメントは STB リングの設計目標とした機能を実現させる上で大きく貢献したと言える。

参 考 文 献

- 1) H. Wiedemann : *Particle Accelerator Physics* (Springer-Verlag) Vol. 1.

Design Study of Infrared Free Electron Laser with Tohoku Linac

B. Feng^{*}, M. Oyamada, S. Sato¹ and M. Sugawara*Laboratory for Nuclear Physics, Tohoku University, Sendai 982, Japan**¹Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980, Japan*

In this report we discuss the design study of an infrared free electron laser based on the 300 MeV Tohoku Linac. The design parameters of undulator and resonator are proposed. The characteristics of the infrared free electron laser are analyzed numerically by a three-dimension simulation code. The results show that this device can provide satisfactory performance with peak power about ten megawatts over a wavelength range from 4 to 20 μm .

§ 1. Introduction

Free electron laser (FEL) has developed rapidly in last two decades due to its advantage characteristics of high power, high efficiency and tunability of frequency¹⁻⁴. FEL is a device that transforms the kinetic energy of a relativistic beam into electromagnetic radiation. Usually it consists of a relativistic electron beam, which can be provided by an accelerator, and a periodic magnetic field, a so-called undulator (or wiggler) magnet. In addition, for FEL operating as an oscillator two reflective mirrors should be added at the two sides of the undulator, which make the electromagnetic radiation oscillating between them and amplified.

A simple relationship of the radiation wavelength λ_r in an FEL with undulator period λ_u and electron energy factor γ is $\lambda_r = \lambda_u/2\gamma^2$. The wavelength can be tunable by changing the electron energy or undulator period and magnet field, and in principle, the FEL can operate in wavelength region of millimeters to X-ray. The FEL would be the only source capable of providing picosecond pulses of coherent radiation in the infrared wavelength. The

* Visiting scientist from the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800, P. R. China.

FEL based on a radio-frequency accelerator, therefore, has attracted considerable interest in researches and applications of biology, medical, material and industry.

In this reports, the basic equations of free electron laser are summarized in Sec. 2. Several important concepts of FEL are discussed and the requirements of electron beam for FEL are given in this section. We discuss the design of a free electron laser based on the Tohoku Linac in Sec. 3. Then some simulation results of the FEL based on the accelerator parameters are shown in Sec. 4. The conclusions are given in Sec. 5.

§2. FEL Equations

2.1 Basic FEL equations

We consider that an electron beam transforms in an undulator with constant parameter and exchanges its energy with the radiation fields. We suppose that the rms undulator field B_u is polarized, given by the expression

$$\mathbf{B}_u = \sqrt{2} B_u \cos(k_u z) \mathbf{e}_y, \quad (2.1)$$

where $k_u = 2\pi/\lambda_u$ is the undulator wavenumber, λ_u the undulator period and \mathbf{e}_y the unit vector in y direction. The vector potential of radiation field is assumed to be a plane polarized wave in the x direction with a spectrum narrowly distributed about the resonant frequency ω_r , and is expressed in the form

$$\mathbf{A}_r = \sqrt{2} A_r \sin(k_r - \omega_r t + \phi_r) \mathbf{e}_x, \quad (2.2)$$

where k_r is the wave number, ϕ_r the initial phase with respect to the electron and \mathbf{e}_x the unit vector in x direction.

The evolution of momentum and energy of each electron in the reaction region with the undulator field and radiation field is given by the equations,

$$\frac{d(\gamma m v)}{dt} = e[\mathbf{E}_r + v \times (\mathbf{B}_r + \mathbf{B}_u)], \quad (2.3)$$

$$\frac{d(\gamma m c^2)}{dt} = e v \cdot \mathbf{E}_r, \quad (2.4)$$

where \mathbf{E}_r and \mathbf{B}_r denote the radiated electric and magnetic field, respectively. Eq. (2.3) determines the electron trajectory mainly due to the undulator field that make the electron get a transverse velocity component. Eq. (2.4) describes the energy exchange between

electron and radiation field.

The evolution equation for the radiation field with the electrons is described by Maxwell equations, where the moving electrons are used as transverse current density \mathbf{J}_\perp . For simplifying, we constrict to one-dimensional case and use the approximate condition of slowly-varying field amplitude and phase. The wave equation in the one-dimensional approximation is described by

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{A}_r = -\mu_0 \mathbf{J}_\perp. \quad (2.5)$$

where the transverse current \mathbf{J}_\perp is given by the sum over all point currents of the individual electron

$$\mathbf{J}_\perp(\mathbf{x}, t) = e \sum_{j=1}^N v_\perp \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j(t)). \quad (2.6)$$

Substituting the field Eqs. (2.1), (2.2) and the current Eq. (2.6) into the momentum, energy and wave equations, and assuming the condition of the slowly varying field amplitude and phase approximation, we obtain a set of equation of free electron laser in the forms⁵⁾,

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{eK}{\gamma_R mc} E_r [J_0(\xi) - J_1(\xi)] \sin(\Psi + \phi_r), \quad (2.7)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = 2ck_u \frac{\gamma - \gamma_R}{\gamma_R}, \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E = i \frac{KJ_e}{2\varepsilon_0 \gamma_R} [J_0(\xi) - J_1(\xi)] \langle \exp(-i\Psi) \rangle, \quad (2.9)$$

where $E = E_r \exp(i\phi_r)$, $\xi = \frac{1}{2} \frac{K^2}{1+K^2}$, $J_e = ecN/V$, $K = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi mc}$ the undulator parameter and $\Psi = k_u z + k_r z - \omega_r t$. E_r and ϕ_r describe, respectively, the field amplitude and initial phase with respect to the electron. The bracket $\langle \dots \rangle$ indicates the average over all the electrons in a volume V . J_0 and J_1 are the Bessel functions of first kind. γ_R is the resonant energy factor given by a relation of $\gamma_R^2 = \frac{1+k^2}{2} \frac{\lambda_u}{\lambda_r}$.

From Eq. (2.7), for a net energy exchange between electron and electromagnetic wave, the phase Ψ must be stationary, which implies the following resonant condition

$\beta_z = \frac{\omega_r/c}{k_r + k_u}$. According to this condition, the radiation wavelength of FEL is defined by

the following equation

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}(1+K^2), \quad (2.10)$$

where λ_u is the undulator period, and $K = 0.934B_u[T]\lambda_u[cm]$ describes the characteristic of undulator, called as undulator parameter.

Eqs. (2.7) and (2.8) describe the evolution of the electron energy and phase. Eq. (2.9) describes the evolution of radiation field amplitude, in space and time, due to the interaction with electron beam. These are a set of self-consistent FEL equations from which the general time-dependent, saturated behavior of the radiation fields can be described by numerically integrating these motion equations of electrons and radiation fields.

2.2 Small-signal gain

The gain of FEL is a measurement of efficiency of the transfer of electron kinetic energy to radiation field. It is the most important parameter for which determines whether or not the FEL device can reach threshold and lase. The small signal gain in an FEL system is given by the expression⁶⁾,

$$G_0 = 4\sqrt{2} \pi^2 \lambda_r^{3/2} \lambda_u^{1/2} \frac{K^2}{(1+K^2)^{3/2}} \frac{I_p N_u^3}{\sigma_b I_A} f(\Psi), \quad (2.11)$$

where I_p is the peak current of electron bunch, $I_A = 17000A$, σ_b the transverse cross section of electron beam. $\Psi = 2\pi N_u \frac{\gamma - \gamma_R}{\gamma_R}$ is the radiation lineshape function where $f(\Psi) = \frac{d}{d\Psi} \left(\frac{\sin^2(\Psi)}{\Psi^2} \right)$. The lineshape function is an antisymmetric function of energy detuning factor with a maximum value $f(\Psi) = 0.528$ at $\Psi = 1.3$. In case of $K = 1$, $\lambda_r = 1mm$, $\lambda_u = 5cm$, $N_u = 100$ and $f(\Psi) = 0.5$, we obtain $G_0 \approx 2.5 \times 10^{-2} I_p [A]$. This results shows that the electron beam peak current must be several amperes to obtain a gain of several percent.

2.3 Energy spread and emittance of electron beam

The stimulated emission in FEL is related to the spontaneous emission^{7, 13)}. The

spontaneous emission spectrum with an FWHM linewidth for the radiation of $\Delta\omega/\omega = 1/N_u$ is centered about the frequency of expression of Eq. (2.10), where N_u is the total number of undulator periods. It is reasonable that we require the wavelength spread to be smaller than the line half width $1/2N_u$ to avoid significant modification of the emitted line spectrum. Therefore, the electron beam must have an emittance ϵ less than $\lambda_r/2\pi$ to produce radiation at a desired wavelength with a linewidth $1/N_u$. It is reasonable to require that the cross area of electron beam be smaller than that of radiation electromagnetic wave. Thus, the available parameters of optical cavity, such as cavity length, Rayleigh length and sizes of mirrors, should be chosen to satisfy this requirement.

In summary, some basic requirements of electron beam for low-gain FEL oscillator are needed to obtain a good amplification of radiation field : First, energy spread and emittance of electron beam should be smaller than $1/2N_u$ and $\lambda_r/2\pi$, respectively. Second, transverse cross section of electron beam should be smaller than that of radiation wave. Third, peak current of an electron bunch should be several amperes or larger to obtain a gain of several percent.

§ 3. Design of FEL

3.1 Setup of FEL

The radio-frequency linear accelerators are usually used to provide high quality electron beam for free electron lasers. A typical FEL device is shown in Fig. 1. The pulsed electron beam is led from linac through a transport line and is focused into the interaction region in the center of undulator. Because of the limitation of electron beam current in a linac, the gain is small for single pass, hence the FEL is usually operating as an oscillator. Two reflection mirrors are placed at the two sides of the undulator. The radiation electromagnetic wave, oscillating between two reflective mirrors, can be repeatedly amplified. The length of the cavity must be taken to keep the electron bunches and radiation pulses be synchronized when they enter the undulator interaction region. The radiation electromagnetic wave can be coupled from the central hole of a reflecting mirror and then is fed into a measurement system.

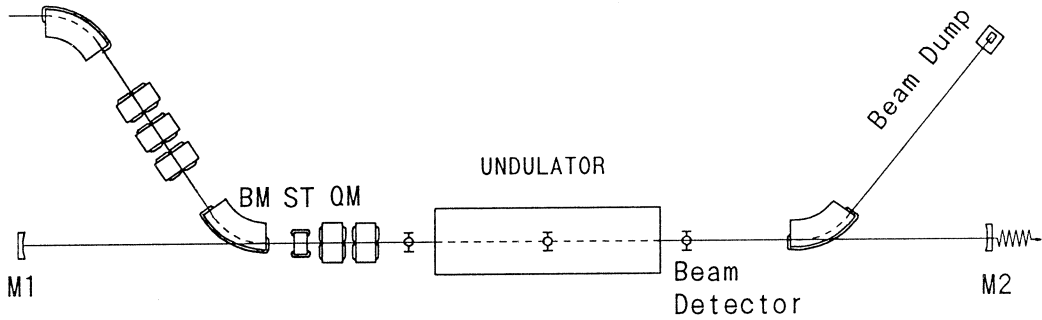


Fig. 1. The schematic diagram of a typical free electron laser oscillator.

3.2 The accelerator

The Tohoku 300 MeV Linac can be used for the research of FELs which could provide a coherent, high power and tunable light source in wavelength range of infrared. The general characteristics of the linear accelerator are shown in Table I. The energy of electron beam can be accelerated in the range 20-75 MeV at the first section of the accelerator. A beam line like in Fig. 1 will be used to transport the beam into an undulator. The beam line should be carefully designed to provide a high quality electron beam with low energy spread and high brightness in interaction region.

The electron energy spread and emittance with energy of 35 MeV are assumed as 0.5% and 45 mm mrad, respectively. The accelerating rf frequency of the linac is 2856 MHz and the macropulse repetition rate is 300 Hz. The micropulse length of 3-4 ps is estimated and the beam cross section of $1 \times 1 \text{ mm}^2$ is supposed. The macropulse

Table I. The parameters of Tohoku Linac.

Accelerator Type	RF Linac
Macropulse length	$3 \mu\text{s}$
Micropulse length	3-4 ps
Micropulse repetition rate	2856 MHz
Beam energy	10-75 MeV
Energy spread	0.5 %
Emittance	45 mm mrad
Macropulse current	100-200 mA
Peak current	8-17 A

current of 100-200 mA and the maximum peak bunch current of 17.5 A are assumed. This peak current density is reasonable to produce enough gain for FEL operation.

3.3 Undulator

The radiation wavelength corresponding to the FEL resonant condition is described in Eq. 2.10. Usually, undulator period is chosen as several centimeter in order to obtain a relatively larger undulator fields, which correspond the K parameter up to several units. Fig. 2 shows relation of the FEL wavelength with energy factor of electron beam. Assuming $\lambda_u = 4.0$ cm, $K = 1$ and the energy factor in the region of 40 to 120, the FEL can operate in the infrared region of the wavelength from 4 to 45 μ m. Fig. 3 shows the changing of radiation wavelength with the undulator period. In case of $\gamma = 70$, $\lambda_u = 4$ cm and the K in the range of 0.5 to 2.0, we can obtain the radiation field with wavelength range of 5 to 21 μ m. As shown in the figures, the radiation wavelength can be tunable by changing both the electron energy and the undulator parameter K .

Undulators are usually constructed of permanent magnets⁸⁻¹⁰. A typical configuration for magnets in an undulator is the so-called Halbach hybrid configuration¹⁰, shown in Fig. 4. In this configuration, the magnetic field generated by the permanent magnet material is focused by the iron pole pieces. Samarium cobalt is specified as the permanent magnet material because of its radiation resistance, and Vanadium Permendur is used as the pole pieces for its higher permeability and saturation flux.

The hybrid undulator is consider to have several important advantages. The magnetic field variation caused by inhomogenities in the magnetization of permanent magnet materials is reduced because the iron pole pieces operate in the saturated region. The perturbation on beam trajectory caused by variations in strength between magnets is reduce. In addition, peak field strength is relative

higher than that of conventional undulator, especially in case of small ratio of gap and period of the undulator. This is because the pole pieces concentrate more of the available magnetic flux within the gap region.

The magnet fields of hybrid

Table II. Parameters of proposed undulator.

Undulator type	Planar permanent
Period	40 mm
Number of periods	60
Total length	2.4 m
Gap variation	10–100 mm
Poles	$10 \times 25 \times 80$ mm ³
Magnets	$10 \times 30 \times 80$ mm ³
Undulator parameter	0–2
Undulator field	0.268 T

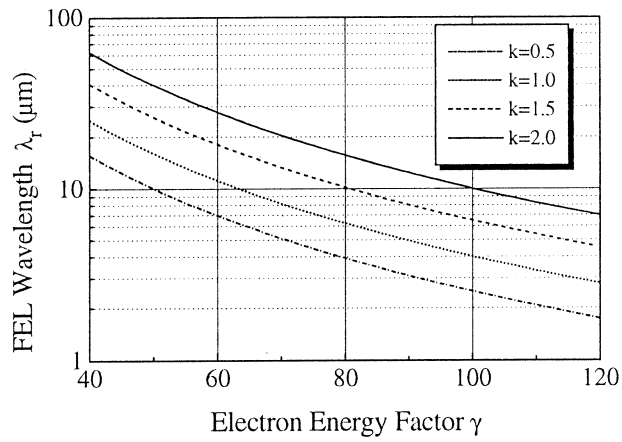


Fig. 2. FEL wave length λ_u vs. electron energy factor γ .

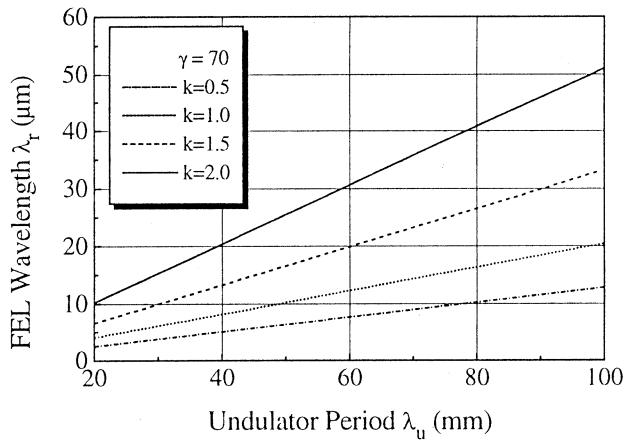


Fig. 3. FEL wavelength vs. undulator period λ_u .

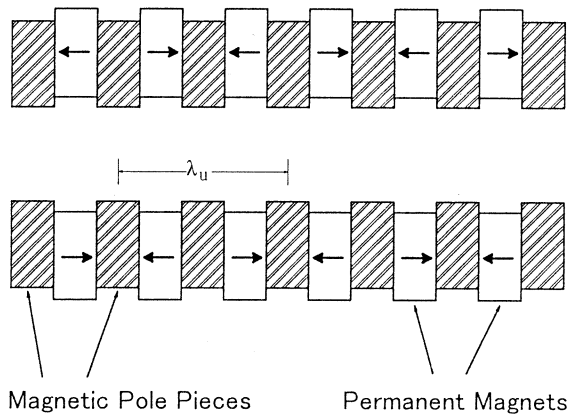


Fig. 4. Configuration of hybrid undulator.

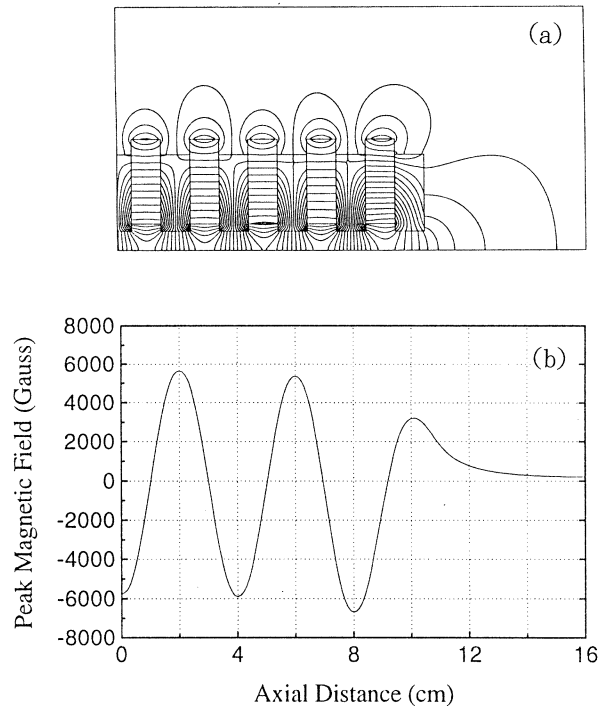


Fig. 5. Field lines (a) and flux distribution (b) of hybrid configuration.

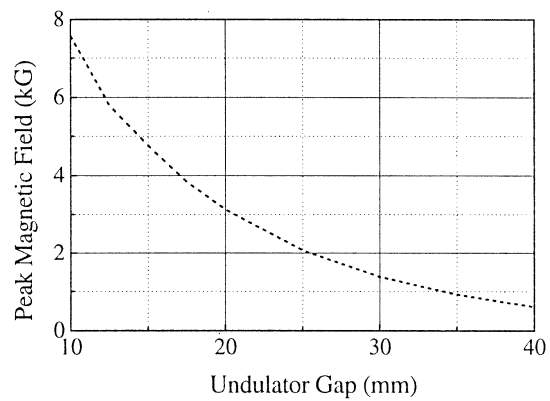


Fig. 6. Peak field of hybrid undulator.

undulator configuration are numerically studied by a two dimension simulation code called POISSON¹¹⁾. The parameters of the hybrid undulator are summarized in Table II. The period of 40 mm and number of period of 60 are taken. The dimensions of the Samarium cobalt magnets are $10 \times 30 \times 80 \text{ mm}^3$, and that of the Vanadium Permendur poles are $10 \times 25 \times 80 \text{ mm}^3$. Fig. 5 shows flux distribution of the hybrid undulator, and Fig. 6 shows the peak field on the axis of the undulator. The maximum peak magnetic field of the undulator is about 0.75 T when the gap is 10 mm.

3.4 Cavity

Fabry-Perot type cavities which consist of two mirrors set at the two ends of the undulator are usually used for free electron laser oscillators because of their simplicity and easy alignment. Gold coating mirrors, having greater resistance to damage, can operate over broad spectral bandwidth and offer excellent reflectance, grater than 99 % for wavelengths beyond about $2 \mu\text{m}$. Laser can be coupled from a central hole in one of the mirrors.

Because the optical pulses in resonators must keep synchronism with beam micropulses entering the undulator, the cavity length d should be chosen to satisfy the relation of $2d = Nl_b$, where l_b is the distance between two microbunches and N an integer. According to the characteristics of the Tohoku Linac, $l_b = 104.97 \text{ mm}$, the cavity length of 5.2395 m is selected corresponding to the light pulse number of $N = 100$ included in the resonators. As a macropulse includes about 5.7×10^3 micropulses, every light pulse will be amplified for about 57 times in duration of a macropulse.

The cavity consists of two mirrors mounted at both sides of the undulator. In order to obtain the maximum gain, free electron laser resonators are generally operated as near-symmetric, near-concentric resonators. Optical beam radius w and radius of curvature R in a optical cavity can be expressed by

$$w^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2 \right], \quad (3.1a)$$

$$R = (z - z_0) \left[1 + \left(\frac{z_R}{z - z_0} \right)^2 \right], \quad (3.1b)$$

where z_0 and w_0 are position and radius of beam waist, respectively. $z_R = \pi w_0^2 / \lambda_r$ is the

Rayleigh range. For a symmetric cavity this is given by $z_R^2 = \frac{d}{2} \left(R - \frac{d}{2} \right)$.

As indicated by Colson the maximum gain occurs for a Rayleigh range closer to $L_u/2$ to $L_u/2\sqrt{3}$ where L_u is the interaction length¹⁴⁾. For these reasons we choose the Rayleigh Length $z_R = 0.8$ m. Thus for the cavity length $d = 5.2395$ m the curvature radii of mirrors $R_1 = R_2 = 2864$ mm, corre-

sponding to cavity parameter $g_{1,2} = 1 - d/R_{1,2} = -0.8294$ and $g^2 = 0.6879$. This is a stable near-concentric resonator. The radius of beam waist $w_0 = 1.6429$ mm at the center of the undulator. The beam radii at entrance of the undulator and at the mirrors are 1.66 mm and 5.62 mm, respectively. The mirrors with diameter of more than 50 mm are effective to reflect the electromagnetic wave. The parameters of the cavity are summarized in the Table III.

Another important parameter is the angular tolerance for the mirrors. The alignment tolerance of mirrors is given in case of a symmetric cavity by^{5,12)}

$$\theta_M \ll \left(\frac{2\lambda_r}{\pi d} \right)^{1/2} (1-g)^{1/4} (1+g)^{3/4}. \quad (3.2)$$

The tilt alignment or drift in the cavity mirrors must be kept much smaller than this value. Taking the cavity parameters in Table III, we find the alignment tolerance $\theta_M \ll 350 \mu$ rad for the wavelength of 10.6 μ m. Therefore it is available for a mirror controlling system with tilt tolerance about 10 μ rad.

§ 4. Numerical simulation

We developed an FEL oscillator code based on the FEL amplifier simulation code¹⁵⁻¹⁷⁾ which used the nonlinear equations of motion for electron and the paraxial wave equations for the radiation¹³⁾. This is a time-independent, three-dimensional and axisymmetric FEL

Tsble III. Parameters of proposed optical cavity.

Cavity type	Symmetry
	Near-concentric
Mirror material	Gold coating
Coupling method	Hole on one mirror
Cavity length	5.2395 m
Radii of mirrors	2.864 m
Mirror diameter	0.05 m
g papameters	-0.8294
Rayleigh range	0.8 m
Beam waist (at $\lambda_r=10.6\mu\text{m}$)	1.66 mm
Mirror reflectance	99.8 %

oscillator code. According to the design parameters of the infrared FEL oscillator with the Tohoku Linac, we simulated the its performance.

We consider the FEL operating as oscillator consisted of a near-concentric optical cavity and an undulator placed at the center. The initial distribution of electrons in a bunch is assumed to have parabolic form in space and random form in energy. According to the operation conditions of Tohoku Linac, an electron beam with energy of 34.2 MeV, bunch length of 1.2 mm and peak bunch current of 15 A is taken. The energy spread and the emittance of electron beam are estimated as 0.5 percent and 45 mm mrad, respectively. The period of undulator is 40 mm, and its total length is 2.4 m with respect to 60 periods. We take the undulator parameter $K = 1.2$ corresponding to the peak magnetic of 0.45 T. In this case the gap of undulator is about 15 millimeters. As discussed in Sec. 3.4, the cavity length must be chosen to satisfy the synchronization condition between the light beam and the electron beam. A cavity length of 5.2395 m is used. The total reflectance of the cavity is assumed as 99.8%. The laser beam is coupled from the hole with radius of 0.5 mm in one reflection mirror. These parameters and the simulation results are summarized in Table IV.

Some typical numerical simulation results are shown in the flowing. In Fig. 7 the peak power gain is shown as a function of axial position. The initial power is about 0.05 W which can be produced by the spontaneous radiation of electron beam in the undulator field. The radiation enhances rapidly in the initial several periods of the undulator. Then it increases linearly

Table IV. Typical simulation parameters and results.

<i>Electron beam :</i>	
Energy	34.2 MeV
Energy spread	0.5 %
Radius	1 mm
Emittance	45 mm mrad
<i>Undulator magnet :</i>	
Period	40 mm
K-parameter on axis	1.2
Length	2.4 m
<i>Optical cavity :</i>	
Cavity length	5.2395 m
Radius of curvature of mirrors	2.864
Rayleigh range	0.8 m
<i>Radiation Field :</i>	
Wavelength	10.6 μ m
Efficiency	0.24 %
Peak Power	\sim 10 MW

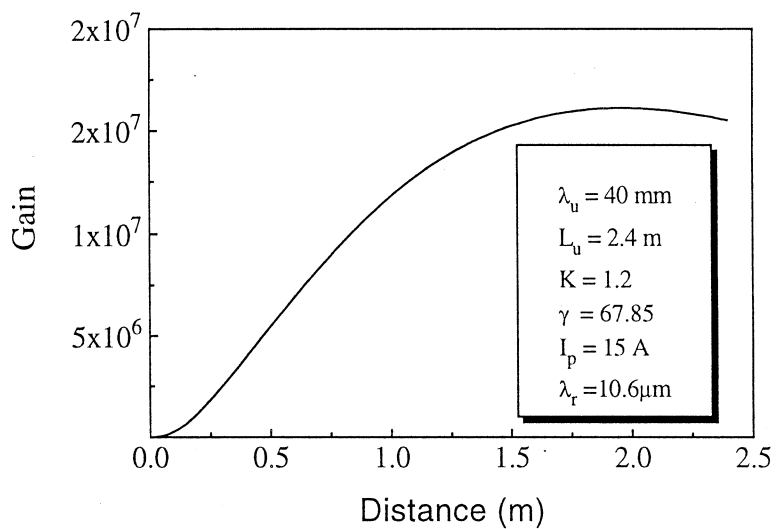


Fig. 7. The power gain as a function of axial distance.

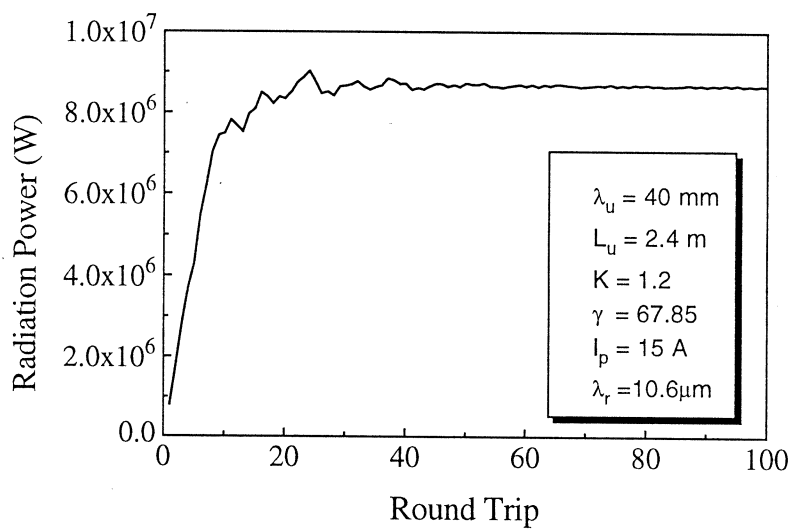


Fig. 8. The radiation power as a function of oscillating numbers of radiation pulses between the reflection mirrors.

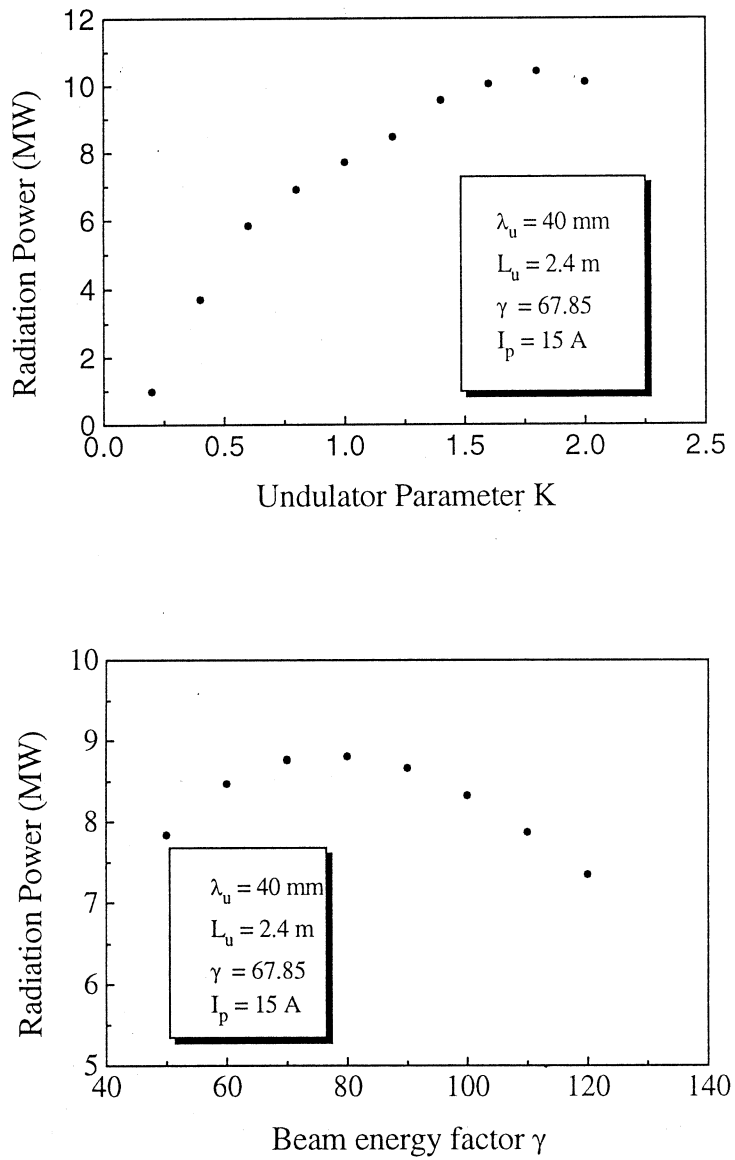


Fig. 9. The radiation power as a function of a) undulator parameter K , and of b) beam energy factor γ .

through about 1.5 m and reaches to saturation at axial distance of 2 m. The reason of saturation is believed as that the electron beam is heated and its energy can not satisfy the resonant condition of Eq. (2.10). Thus the energy of electron can not be transmitted to the radiation.

Fig. 8 shows the radiation power as a function of oscillating numbers of radiation pulses between the reflection mirrors. The radiation power of FEL oscillator increases exponentially from noise before pass number of 15. After that it gradually reaches to saturation with a value of about 8.6 MW. Assuming 10 percent of the radiation power to be coupled from the hole of one mirror, the laser power about a megawatt will be obtained, corresponding to average radiation power of ten kilowatts. These laser pulses have the similar time construction, thus the duration of pulse is as short as several picosecond.

Fig. 9. (a) shows the simulation results of output power as a function of undulator parameter K . We have chosen the undulator period of 40 mm and beam energy factor of 67.85, corresponding to beam energy of 34.2 MeV. The laser wavelength changes in the range of 4.5 to 21.7 μm if we tune the undulator parameter K from 0.2 to 2.0. As shown in the figure, laser power obtains relative enhancement in the region of higher undulator fields, i.e. in the longer wavelength region. This is because that gain is greater in case of larger undulator field. The radiation powers are shown as a function of beam energy factor γ in Fig. 9. (b). As shown in the figures, the laser wavelengths can be tuned by undulator field

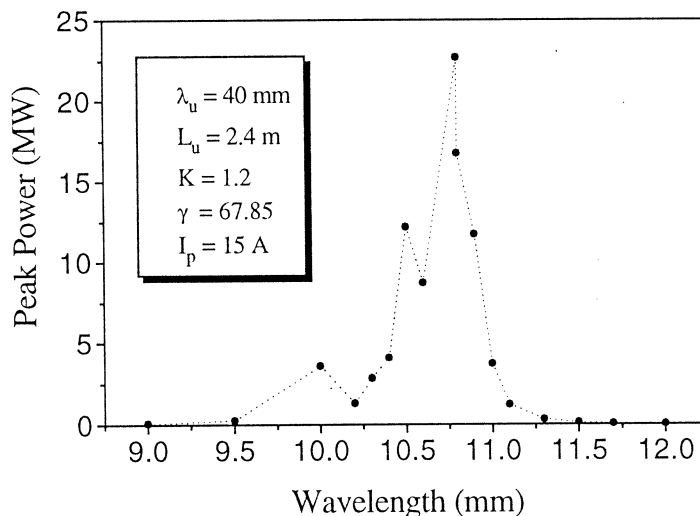


Fig. 10. The laser power spectrum.

or by electron beam energy in near-infrared region.

Fig. 10 show the laser power spectrum. The emissions of radiation are amplified near the resonant wavelength range. We also notice that the maximum power occurs at a longer wavelength region than the resonant wavelength $10.6 \mu\text{m}$. It implies that the initial energy of electron beam should be slightly higher than the resonant energy to obtain the maximum output laser power at the resonant wavelength.

§ 5. Conclusions

Based on above discussion and the operating parameters of Tohoku Linac, it is possible to realize an infrared free electron laser oscillator with this accelerator. The design parameters of the Hybrid undulator and the optical cavity for the FEL device are proposed in Tables II and III. The results of simulation by a three-dimension code show that the FEL device may be operating as a coherent radiation source with peak output power of several megawatts in the near infrared region. The duration of radiation pulse is about a few picosecond and the wavelength can be changed easily by tuning the beam energy or the undulator fields.

References

- 1) L. R. Elias *et al.* : Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 717.
- 2) D. A. G. Deacon *et al.* : Phys. Rev. Lett. **38** (1977) 892.
- 3) I. B. Drobyazko *et al.* : *Proc. 11th Int. Conf. on FEL* (Naples, FL, Aug. 1989).
- 4) T. J. Orzechowski *et al.* : Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 889.
- 5) C. A. Brau : *Free-Electron Lasers* (Academic Press, New York, 1990).
- 6) C. Pellegrini : *Free Electron Lasers* (Plenum Press, New York, 1983) p.91.
- 7) J. M. J. Madey : Nuovo Cimento **50** (1979) 1.
- 8) K. Halbach : Nucl. Inst. Meth. **187** (1981) 109.
- 9) G. Ramian *et al.* : Nucl. Inst. Meth. **A250** (1986) 125.
- 10) K. Halbach : J. Physique **44**, Colloc. C1 (1983) 211.
- 11) K. Halbach *et al.* : Particle Accelerators **7** (1976) 213.
- 12) S. Benson : Nucl. Inst. Meth. **A304** (1991) 773.

- 13) N. M. Kroll *et al.* : IEEE J. Quantum Electron **QE-17** (1981) 1463.
- 14) W. B. Colson and P. Elleaume : Appl. Phys. **29** (1982) 101.
- 15) T. M. Tran and J. S. Wurtele : Computer Phys. Commun. **54** (1989) 263.
- 16) T. M. Tran *et al.* : Phys. Reports **195** (1990) 1.
- 17) P. Jha *et al.* : Nucl. Inst. Meth. **A331** (1993) 477.

コヒーレント放射によるバンチ形状の計測(I) — マーチン・パレット型干渉分光計の製作 —

核理研, 科研*

渡辺勝美・小山田正幸・中里俊晴

浦澤茂一・内田智久・柴田行男*

池沢幹彦*・伊師君弘*

§ 1. はじめに

コヒーレント放射光は1989年, 核理研の300MeV ライナックを用いて世界で初めて観測された¹⁾。それ以来, 他の電子ライナックでもコヒーレント放射光が観測され, 研究がなされている²⁻⁴⁾。コヒーレント放射のスペクトルはバンチ形状の情報を含んでいるので, バンチ形状の計測にこれを応用することができる。

バンチ形状を計測する方法としては, ビームによって発生する光, たとえば遷移放射光, チェレンコフ光, シンクロトロン放射光等をストリークカメラによって測定する方法があるが, シンクロトロン放射光以外は発光の方法はビームを破壊するものである。破壊的な測定は手軽ではあるが, ビーム使用と計測が両立できない。また, ストリークカメラの分解能は0.2ps程度であり, 将来計画されているリニアコライダのバンチ長0.27psを計測するには誤差が大きすぎる。これに対し, コヒーレント放射光の測定によるバンチ形状計測ではビームを非破壊で測定することができ, 分解能も十分である。

本実験では干渉分光による方法でコヒーレント放射を計測してバンチ形状を求める方法を採用することにし, そのための干渉計の設計, 製作を行った。さらに, これを用いて, 高圧水銀灯のスペクトルを計測してコヒーレント放射の計測のための較正を行ったので, その結果について報告する。

§ 2. コヒーレント放射

コヒーレント放射のスペクトルは, 次式で与えられる。

$$I_{\text{tot}}(\omega) = I(\omega)\{N + N(N-1)f(\omega)\} \quad (1)$$

ここで, $I(\omega)$ は素過程の放射スペクトル, $f(\omega)$ はバンチ形状因子で,

$$f(\omega) = \left| \int S(z) e^{\frac{i\omega z}{c}} dz \right|^2 \quad (2)$$

である。 $S(z)$ は粒子の密度分布関数で、

$$\int S(z) dz = 1 \quad (3)$$

となるように規格化してある。

コヒーレントな場合においては、実際のバンチの粒子数は非常に大きいので、(1)式で N についての 1 次の項は無視できて

$$I_{\text{tot}}(\omega) \simeq N^2 f(\omega) I(\omega) \quad (4)$$

と書ける。これよりバンチ形状因子がわかるので、(2)式を逆フーリエ変換すればバンチ形状が求められることになる。

§ 3. フーリエ分光法

3.1 フーリエ分光法の特徴

コヒーレント放射のスペクトルの計測にはフーリエ分光法を用いる。フーリエ分光法は光源からの光を二つの光束に分け、その二光束間に光路差をつけて干渉させて得られた干渉図形（インターフェログラム）からフーリエ変換によってスペクトルを求めるという方法である。この二光束干渉に用いられる干渉計は、二光束を得る方法により次の 3 種類に大別される。1) 振幅分割によるマイケルソン型、2) 波面分割によるラメラ型、3) 偏光方向の分割（振動面分割）によるマーチン・パレット型である。これらのいずれかの方法により、分割された 2 つの光束は光路差をつけられた後に再び重ね合わされる。こうして、測定周波数全域にわたって変調がかけられた光がインターフェログラムとしてコンピュータに取り込まれフーリエ変換という分光操作が行われる。すなわち、フーリエ分光法がもつ特徴のひとつはフーリエ分光法における光学系は分光器ではなく、対象全域スペクトルの波長成分同時変調器として働く二光束干渉計と変調波周波数解析器として働くコンピュータの結合によって 1 検出器による同時測光（multiplexing, 多重度の測光）が可能である（multiplex advantage, Fellgett advantage）という点である。また、分散型分光器のように測定していない周波数成分を捨てることがないので、明るい光学系に設計できる（Jacquinot advantage, optical throughput advantage）という利点がある。ところが、これは強度の弱い周波数域と強度の強い周波数域を同時に測っているということであり、そのために強度の弱い周波数域の信号は強度の強い周波数域のノイズに埋もれてしまうことになって、実質的なダイナミックレンジは回折格子を用いた分光器の方が大きい場合がある。それは複数枚の回折格子を使用する場合である。回折格子 1 つでは測定可能な周波数領域はブレイズ波長を λ としたとき $\lambda \pm \lambda/2$ 程度しかないが、測定可能な周

波数域の異なる回折格子を複数枚用いることによって広い範囲で測定を行うことができる。ただし、高次の回折光や迷光を除くためのフィルタも必要であり、回折格子やフィルタの交換の手間がかかる。分解能については分散型分光器では回折格子の幅に製作上の限界があるのたいてい、干渉計で光路差の連続走査が可能であるので高い分解能が得られる。

3.2 アポダイゼーション

実際の計測においては、インターフェログラムの測定領域は有限であるので、その端点において急峻な打ち切り点を持つ。したがって、その打ち切り点のためにインターフェログラムのフーリエ変換は高周波成分をもち、スペクトルの解釈に誤りを生じさせることがある。これを抑えるために、急峻な打ち切り点を持たない裾をひいた形の関数 $A(x)$ をインターフェログラムに掛けてフーリエ変換するという方法が用いられる。この操作をアポダイゼーション (apodization) といい、関数 $A(x)$ をアポダイジング関数 (apodizing function) という。

本実験ではアポダイジング関数としてハニング関数

$$A(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi x}{L}, \quad 0 < x < L \quad (5)$$

を用いている。

3.3 位相補正

インターフェログラムは理論的には左右対称な偶関数であるが、実際に得られるインターフェログラムは非対称な場合が多い。これは位相誤差によるもので、サンプリングした点が光学的な原点にこないということや、光学系の調整不足が原因である。位相誤差を持ったままのインターフェログラムをフーリエ変換して得られるスペクトルはひずんだ形になり、場合によっては符号が反転してしまうこともある。したがって、何らかの方法によってこの位相誤差を補正してやらなければならない。本実験では絶対値法という方法を用いている。

絶対値法は位相誤差が $\phi(\sigma)$ であるとき、スペクトルが

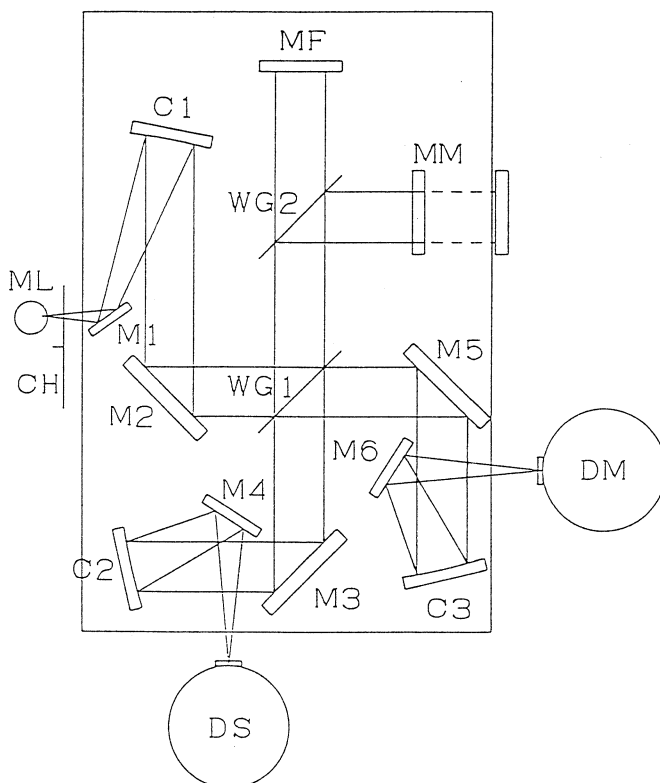
$$\begin{aligned} B'(\sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{i2\pi x\sigma} dx \\ &= B(\sigma) e^{i\phi(\sigma)} \end{aligned}$$

となることから、 $B'(\sigma)$ の絶対値をとることによって正しいスペクトル $B(\sigma)$ を得る方法である。ただしこの方法は両側のインターフェログラムをとる必要がある。

§ 4. マーティン・パプレット型干渉分光計の製作

今回、マーティン・パプレット型 (振動面分割型) の干渉分光計を製作した。その光学系を

第1図に示す。マーティン・パプレット型はビームスプリッターとしてワイヤーグリッドを用いるものである。そのため、ワイヤーの間隔より長波長側全領域での測定が可能で、波長領域



第1図 マーティン・パプレット型干渉計。ML：高圧水銀灯，CH：チョッパー，M1：平面鏡（ $\phi 60$ ），C1，C2，C3：球面鏡（ $\phi 100$ ，焦点距離 $f=300$ ），M2，M3，M5：平面鏡（ $\phi 130$ ），M4，M6：平面鏡（ $\phi 80$ ），MF，MM：平面鏡（ $\phi 100$ ），WG1，WG2：ワイヤーグリッド（タングステンワイヤー，dia $10\mu\text{m}$ ，spacing $25\mu\text{m}$ ），DM，DS：シリコンフォトメータ。

でビームスプリッターを換える必要のあるマイケルソン型より有利である。ワイヤーグリッドはSPECAC製で、直径 $10\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーを間隔 $25\mu\text{m}$ で並べたものを使用した。設計に際しては小型で軽量になるよう配慮した。主に、アルミの定盤を使用することで軽量化をはかり、また検出器を干渉計の外側に配置することにして、可動鏡移動のため精密X軸ステージをワイヤーグリッドを配置するアルミプレートの下に据えつけ、無駄な面積を作らないようにして干渉計の大きさがおおかた光束の大きさのみで済ませるようにした。ただしこの二階建て構造のために光軸高さが 240mm と高くなり、振動に対して不安定であるのが欠点である。

高圧水銀灯から発した光は、コリメータ鏡 C1 で平行光束にされてワイヤーグリッド WG1 で 2 つに分けられる。WG1 は実際の放射光の計測を仮定し、(コヒーレント放射光はビームの軌道面に水平な方向に強く偏光している。) 水平方向に対して 45° 傾けた方向にワイヤーが張られているよう配置した。分けられた光の一方は、そのまま参照用として検出器 DM に入るようになっている。(ただし、本実験においては参照用の光は測定していない。) もう一方はワイヤーの方向を WG1 に対して 45° 傾けて配置してあるワイヤーグリッド WG2 に入り、さらに 2 つに分けられる。一方は固定鏡 MF, もう一方は可動鏡 MM で反射し再び WG2 で再び重ね合わせられる。このとき、互いに直交した直線偏光が光路差に対応した位相のずれをもって重ね合わせられるので、重ね合わせられた光は楕円偏光となる。この楕円偏光が再度 WG1 に達したとき、直線偏光成分のみが通過し、コリメータ鏡 C2 で集光され、検出器 DS に導かれ検出される。

可動鏡の走査範囲は 100mm, すなわち最大光路長にして 200mm までの測定が可能である。したがって、最高分解能は 0.05cm^{-1} である。また、パルスモータ駆動精密ステージの 1 パルス当たりの移動量は $1\ \mu\text{m}$ であるので、この干渉計における測定可能なスペクトルの最大波数 σ_{max} は、サンプリング定理⁵⁾ (スペクトルに重なりが起こらないための条件式)

$$\sigma_{\text{max}} \leq \frac{1}{2h} \quad (7)$$

により 5000cm^{-1} である。ここで、 h はサンプリング間隔である。

可動ステージ制御およびデータ収集は GP-IB を介して、パーソナルコンピュータによって行う。また、可動ステージはコントローラによって直接操作することもできる。

§ 5. 高圧水銀灯による較正実験

5.1 光源

光源は 100W の高圧水銀灯 (UM-102, Ushio Co. 製) を用いた。本来は黒体炉を使うのが理想的であるが、大型で取り扱いが面倒である。高圧水銀灯は絶対温度 3600K の擬似的な黒体放射光源とみなすことができるとされているので、本実験においてはこの光源を用いた。水銀灯は水冷用のランプハウスに入っており、点灯中は常時水冷されている。点灯時、水銀灯内部の水銀蒸気圧は 2~3 気圧になり、低圧水銀灯よりも放射効率が高い。この光源からの放射は $100\ \mu\text{m}$ より短波長の領域では石英ガラスの管壁からの熱放射であるが、それより長波長側では水銀アークからの放射が支配的になる。

この光源のスペクトルを計測し、プランクの黒体輻射の公式との比をとることにより、干渉分光計の装置関数（応答係数）が求められる。これを用いることにより、未知の光源を計測したときのスペクトルの絶対値を求めることができる。すなわち、未知光源に対する干渉計の較正が可能となる。

5.2 検出器

ボロメータは受光面の温度変化に伴う電気抵抗の変化を利用する検出器である。本実験では受光部と温度センサにそれぞれ別の素子を用いる複合型のシリコンボロメータ（Infrared Laboratories Inc. 社製）を使用した。（Dewar Model HDL-3, 現在これに対応するものはHDL-5）検出器のデュワ容器は断熱用の液体窒素容器と、その下部に冷却用の液体ヘリウム容器が内蔵され、最下部に検出素子を取り付けられている。吸収体としてのサファイア基板（5 mm 角）の受光部にシリコンの温度センサが熱的に接続されている。サファイアの吸収体はサファイアの基板の一面にニクロムの金属皮膜がついており、この皮膜が入射光の50%吸収を可能にしている。シリコンのセンサにはリードワイヤーが取り付けられてあり、デュワ容器外部に取り出すコネクタに接続される。

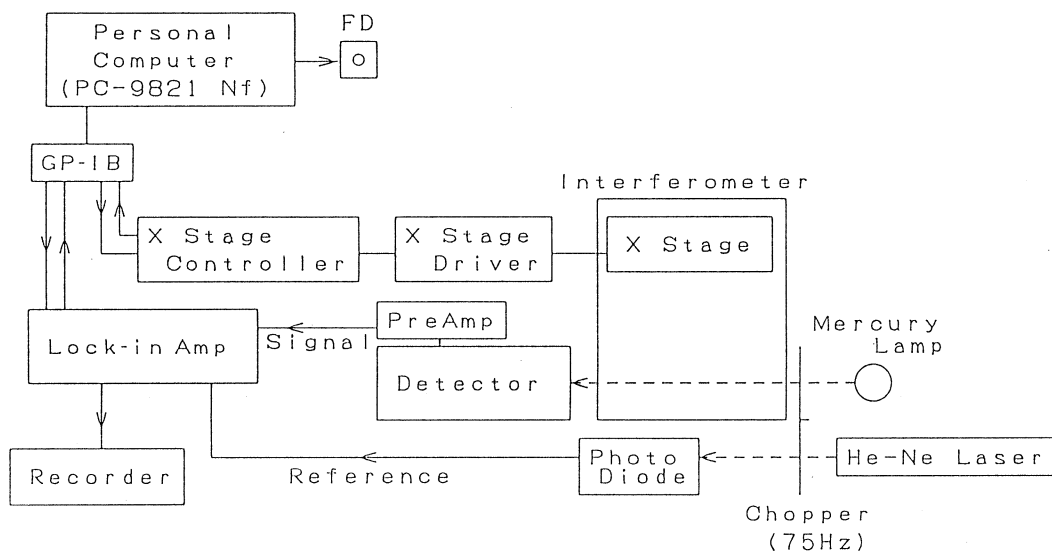
温度変化によって生じた電圧は信号として取り出され、プリアンプ（LN-6C, Infrared Laboratories Inc. 社製）で200倍あるいは1000倍に増幅されBNCケーブルを通してデータ取り込み系に入る。

5.3 制御系, データ収集系

計測制御系全体のブロック図を第2図に示す。

干渉分光計の可動鏡は可動ステージによって移動させる。可動ステージはドライバ、コントローラを介し、GP-IBバスによってパーソナルコンピュータから制御する。また、コントローラから直接、制御する事もできる。

検出器に付いているプリアンプからの信号は、ロックインアンプ（Model 5210, EG&G Princeton Applied Research Co. 製）に入る。ロックインアンプは外部からの参照信号の周波数に同期した信号のみを増幅することによって、ノイズに埋もれた微弱信号を取り出し、増幅している。本実験においては、75Hzのチョッパーで高圧水銀灯からの測定光とヘリウムネオンレーザーの光を断続させ、それぞれボロメータ、フォトダイオードで検出している。前者は測定信号として、後者は参照用の信号としてそれぞれロックインアンプに入り、測定信号は参照信号の周波数で増幅される。ロックインアンプはA-D変換器を内蔵しており、ここで増幅された信号の出力はA-D変換されたのち、GP-IBバスでパーソナルコンピュータに取り込ま



第2図 計測、制御系ブロック図。可動ステージはドライバ、コントローラを介し、GP-IBバスによってパーソナルコンピュータから制御する。ロックインアンプはA-D変換器を内蔵しており、ここで増幅された信号の出力はA-D変換されたのち、GP-IBバスでパーソナルコンピュータに取り込まれ、ハードディスクあるいはフロッピーディスクに記録される。

れ、ハードディスクあるいはフロッピーディスクに記録される。データ収集及び制御は、Visual Basicによる計測制御用プログラムを製作し、これを用いた。

5.4 高圧水銀灯のスペクトル測定

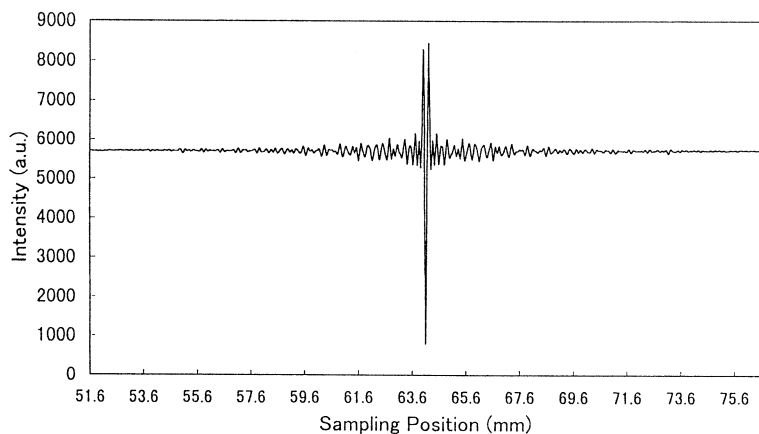
科学計測研究所において、高圧水銀灯のスペクトル測定の実験を行った。ここでは、得られた結果について述べる。

可動鏡の移動25mm、サンプリング間隔 $20\mu\text{m}$ で6回測定して平均を取ったインターフェログラムを第3図に示す。

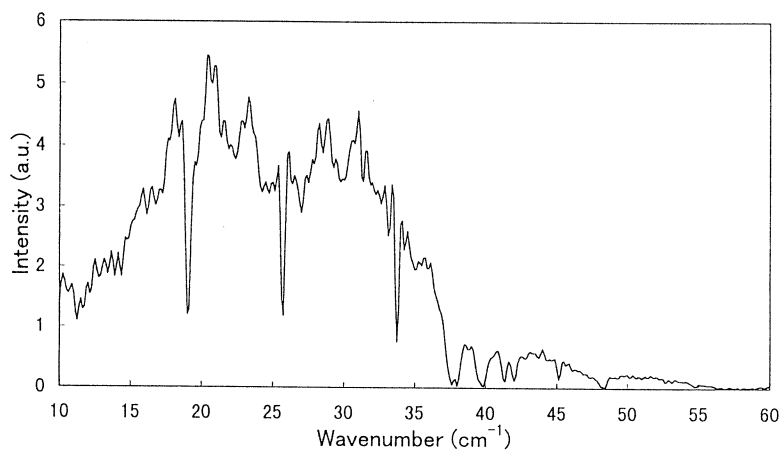
スペクトルは、インターフェログラムにアポダイゼーションとしてハニング関数を掛けた後に、高速フーリエ変換を行うことによって得られる。高速フーリエ変換はSand-Tukeyのアルゴリズム⁶⁾を用いたプログラムによって行っている。そのあと、スペクトルの絶対値を計算することによって位相補正を行い、最終的なスペクトルが得られる。

第4図は第3図のインターフェログラムから以上の手順で得られたスペクトルである。可動鏡移動距離が25mmであるから、対応する理論分解能は 0.2cm^{-1} である。

遠赤外領域での、水蒸気による吸収線が見られる。 40cm^{-1} 以上の波数域でスペクトル強度が減少しているのは、空気中で測定を行っているためにドップラー効果や衝突によって吸収線



第3図 インターフェログラム（可動鏡移動距離25mm）。可動鏡の移動25mm，サンプリング間隔20 μm で6回測定して平均を取ったインターフェログラム。



第4図 スペクトル（分解能は0.2 cm^{-1} ）。可動鏡移動距離25mm，サンプリング間隔20 μm 。第3図のインターフェログラムから計算。

が広がってしまうためである。

5.5 較正方法

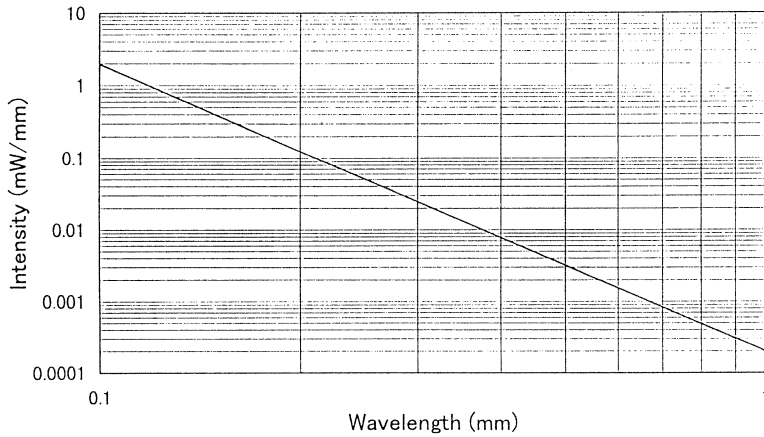
実際にコヒーレント放射の強度を測定したとき，その絶対値は既知の光源に対する強度比を求めておくことによって較正ができる。測定放射光スペクトルの絶対値は次式で計算できる。

$$\int P_{SR}(\lambda) d\Omega = \frac{I_{obs}^{SR}(\lambda)}{I_{obs}^{BB}(\lambda)} P_{BB}(\lambda) \Omega_{BB} S_{BB} \quad (8)$$

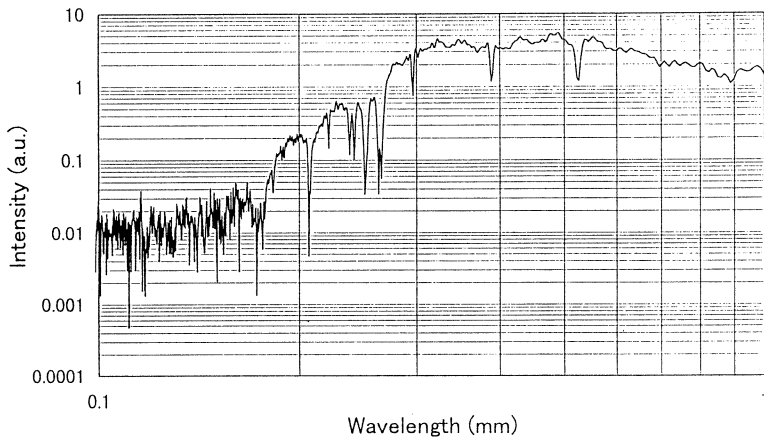
ここで $P_{SR}(\lambda)$ ， $P_{BB}(\lambda)$ はそれぞれ，コヒーレント放射黒体輻射の強度スペクトルの絶対

値で、 $I_{obs}^{SR}(\lambda)$, $I_{obs}^{BB}(\lambda)$ は実際に測定で得られるスペクトル、 Ω_{BB} は黒体の発光点から集光鏡に対して張る立体角、 S_{BB} は黒体の発光面積である。高圧水銀灯は温度3600Kの黒体とみなすことができるので、あらかじめ既知の光源として高圧水銀灯のスペクトル $I_{obs}^{BB}(\lambda)$ を測定し、 $P_{BB}(\lambda)$ を計算しておけば、コヒーレント放射を計測時に強度を絶対値で求めることができる。今回の実験時のパラメータにおける黒体輻射強度の理論値の計算結果を第5図に示す。 S_{BB} , Ω_{BB} の値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} S_{BB} &= 7.854 \times 10^{-5} [\text{m}^2] \\ \Omega_{BB} &= 8.55 \times 10^{-2} [\text{sr}] \end{aligned} \quad (9)$$



第5図 黒体放射強度のスペクトル。実験時のパラメータ ($S_{BB} = 7.854 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$, $\Omega_{BB} = 8.55 \times 10^{-2} [\text{sr}]$) における黒体輻射強度の理論値。



第6図 高圧水銀灯のスペクトル (第4図と同じスペクトル, 横軸: 波長)。

実際に計測した高圧水銀灯のスペクトルと黒体輻射強度の理論値とを比較するために、第6図に第4図と同じスペクトルを両対数グラフで表す。第5図と比較すると、短波長域でのスペクトルが著しく減少している様子がよくわかる。

§ 6. ま と め

本研究では、コヒーレント放射によってバンチ形状を計測するにあたって、マーチン・パプレット型干渉分光計を製作し、それを用いた高圧水銀灯測定による較正実験を行った。

サンプリング幅 $20\mu\text{m}$ 、可動鏡移動 25mm でインターフェログラムの測定を行った。このインターフェログラムから Sande-Tukey のアルゴリズムを用いた高速フーリエ変換によりスペクトルを計算した。

高圧水銀灯を 3600K の黒体とみなし、実際の計測結果と理論値の比をとることによって、コヒーレント放射計測時の干渉計の較正ができる。高圧水銀灯のスペクトル計測とあわせて黒体放射のスペクトルの計算を行った。実際のコヒーレント放射の測定時にも同様の方法で較正ができる。

本実験では、バンチ形状の計測まで至らなかったもので、今後の課題として、スペクトルからバンチ形状を計算するためのプログラムの開発を行い、実際に加速器を使用してバンチ形状計測を行いたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, O. Konno, A. Kagaya, R. Kato, T. Kimiyama, Y. Torizuka, T. Nanba, Y. Kondo, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka and M. Ikezawa : *Phys. Rev. Lett.* **63** (1989) 1245.
- 2) J. Ohkuma, K. Tsumori, S. Okuda, K. Kimura, T. Yamamoto, T. Hori, S. Takamuku and S. Suemine : *Proc. of the 15th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, 1990* (1990) p.218.
- 3) Y. Shibata, K. Ishi, T. Takahashi, F. Arai, M. Ikezawa, K. Takami, T. Matsuyama, K. Kobayashi and Y. Fujita : *Phys. Rev.* **A44** (1991) R3449.
- 4) E. B. Blum, U. Happek, and A. J. Sievers : *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Rev. Sec.* **A307** (1991) 568.
- 5) E. O. Brigham : 高速フーリエ変換 (科学技術出版社, 1978).

偏極標的用の Rb 原子の偏極度，気体厚さの測定

核理研，理学研究科物理*

横川民雄・玉江忠明・阿部和廣
 今野 収・菅原真澄・田中英二
 坪田博明*・中川 格・西川 至
 宮瀬晴久*・山口伸夫・山崎寛仁

§ 1. 序 論

東北大学原子核理学研究施設では，1997年度完成予定のストレッチャー・ブースタリング内のガス内部標的として，偏極重陽子標的を使用することを計画している。偏極とは，スピンの整列したことをさす。スピン整列の度合すなわち偏極度は，ベクトル偏極度，テンソル偏極度で定義され特にスピン1の場合以下の式に従う。

$$P = \frac{W(1) - W(-1)}{W(1) + W(0) + W(-1)} = W(1) - W(-1) \quad (1)$$

テンソル偏極度は，

$$A = \frac{3(W(1) + W(-1)) - 2}{W(1) + W(0) + W(-1)} = 3(W(1) + W(-1)) - 2 = 1 - 3W(0) \quad (2)$$

ここで $W(m_j)$ はスピン準位の占有確率である。

電子散乱の場合，偏極した重陽子原子核標的を用いると断面積に現われる電氣的形状因子の単極子と4重極子を分離することができる。この分離により重陽子基底状態のD波の存在確率，中間子交換流，相対論的効果についての詳細な情報が得られる。偏極重陽子標的を生成するために，我々はスピン交換衝突を用いたオプティカルポンピング法を用いる。この方法では，直接原子核を偏極させるのではなく，まず円偏光（円偏極）したレーザー光を用いてアルカリ原子を偏極させ（オプティカルポンピング），偏極したアルカリ原子を標的原子とスピン交換衝突をさせて標的原子を偏極させる。そして，高周波磁場によって超微細構造遷移をおこさせ原子核を偏極させる。

オプティカルポンピングは，円偏極した光 ($\Delta m_j = \pm 1$) で原子を選択的に励起することによって原子を偏極させる方法である¹⁾。標的を生成する場合には偏極させる原子にアルカリ原子を使用する。このとき，非偏極の放射蛍光によって偏極が崩れる（radiation trapping）こ

とがある。非偏極光を吸収しないようにするために、強い磁場をかけゼーマン分離をおこさせることが効果を上げている²⁾。また、偏極アルカリ原子気体を封入している壁との衝突でアルカリ原子のスピンの緩和が生じる。このことを防ぐために壁をコーティングすることが効果を上げている³⁾。

本研究では、オプティカルポンピング法を用いてアルカリ原子を偏極させ、アルカリ原子の偏極度、気体厚さをファラデー回転法を用いて測定した。

§ 2. 実験方法

直線偏光の偏光面の回転角の測定から偏極度、気体厚さを決定する。原理を以下に述べる。

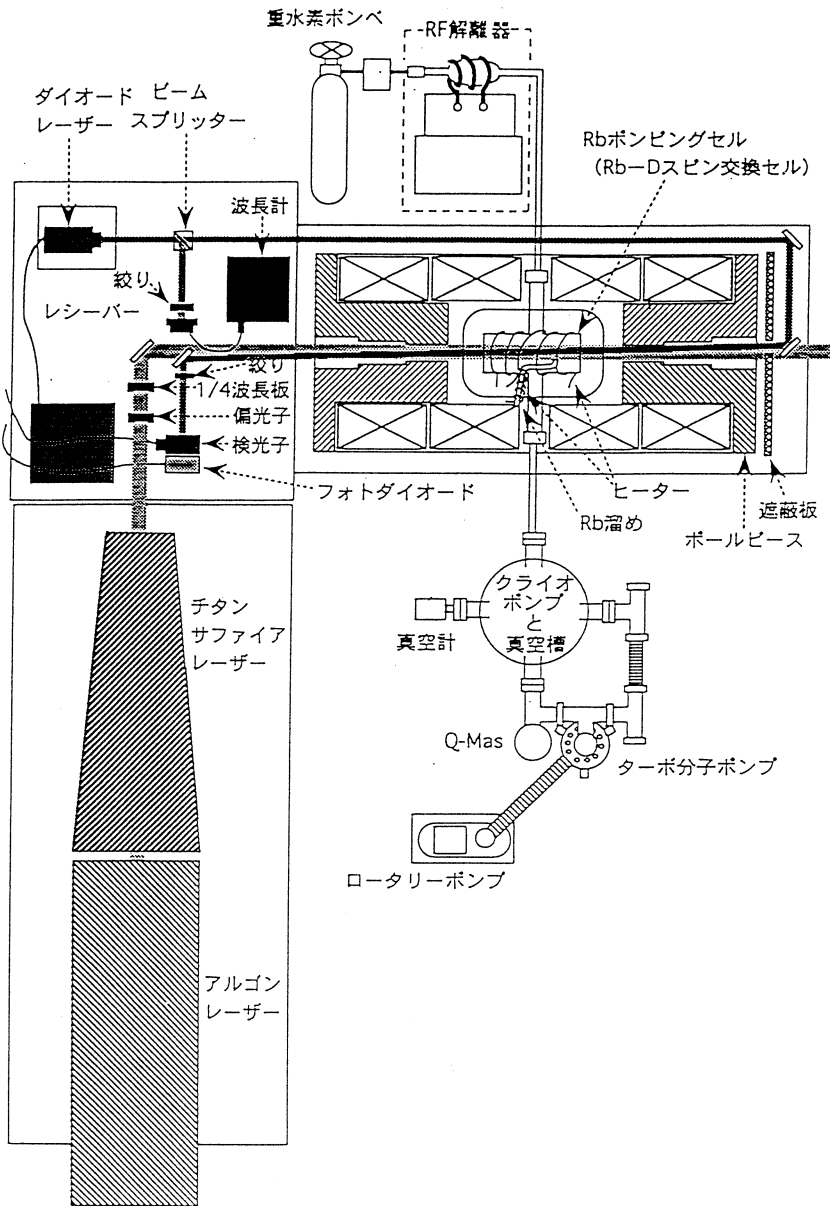
ファラデー回転は、磁場のかけられた媒質中に直線偏光した光が入射すると、その偏光面が回転する現象である。媒質が偏極している場合、スピンによる磁場の効果が加わりさらに回転角が増す。それを式に表わすと、

$$\Phi = \Phi_0 + P\Phi_p \quad (3)$$

となる。ここで、 Φ_0 は偏極していないときの回転角でRbの気体厚さ、磁場の強さ、波長に依存するので、この角度を測定することで気体厚さがわかる。また Φ_p は偏極したとき付け加わる回転角で Φ_0 から計算できるので、 Φ を測定することで式(3)から偏極度 P を求めることができる⁴⁾ (付録参照)。

測定装置を第1図に示す。偏極用Rbはセルに入っており、気体厚さを温度でコントロールできるようになっている。Rbは、Rb金属固体の入っているRb溜めをヒーター管で加熱することによってポンピング用のセルに蒸気となって流入する。ポンピング用のセルも独自にヒーター管で加熱できるような構造となっている。セルはradiation trappingの影響を避けるため磁場がかけられるようソレノイドコイル内に入っている。RbのオプティカルポンピングにはTiサファイアレーザーを用いる。レーザー光はビームスプリッターで直線偏光となり、さらに1/4波長板を用いて円偏光されセル中のRb原子をオプティカルポンピングする。一方Rbの気体厚さ、偏極度はファラデー回転角を測定することによって求める。そのプローブ光としてダイオードレーザーを選んだ。ダイオードレーザーはビームスプリッターを通して偏光成分に応じて2方向に分け、進行方向と垂直に出た光を波長計に導き、波長をモニターする。進行方向の光はRbセルに入射され、検光子を通過させた後フォトダイオードで強度を測定する。波長計はマイケルソン干渉計を使用したもので、RbのD1線(794.76nm)に波長を合わせたTiサファイアレーザーを使って校正した。セル内は、クライオポンプ、ターボ分子ポンプ、

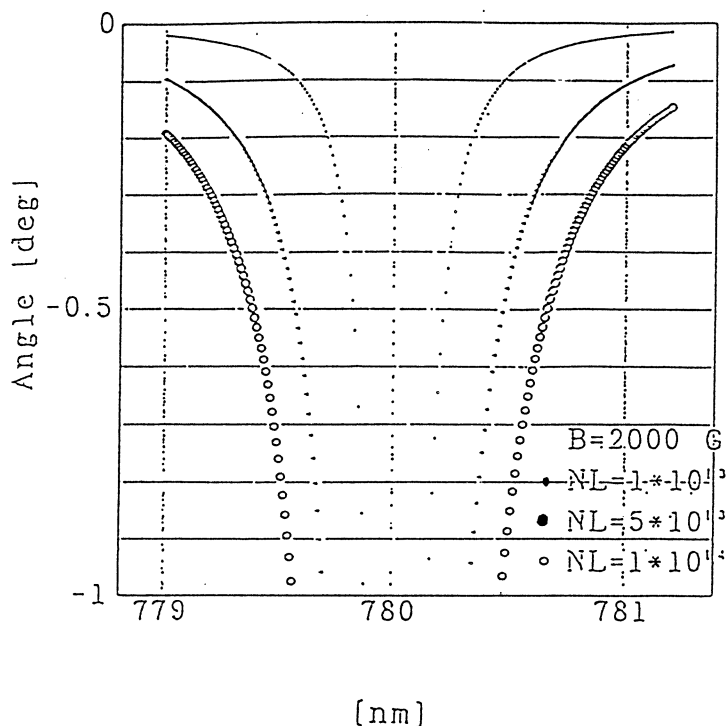
ロータリーポンプで 10^{-5} torr 程の真空 に保ってある。



第1図 Rb ファラデー回転角測定装置。

§ 3. 実験装置の最適化

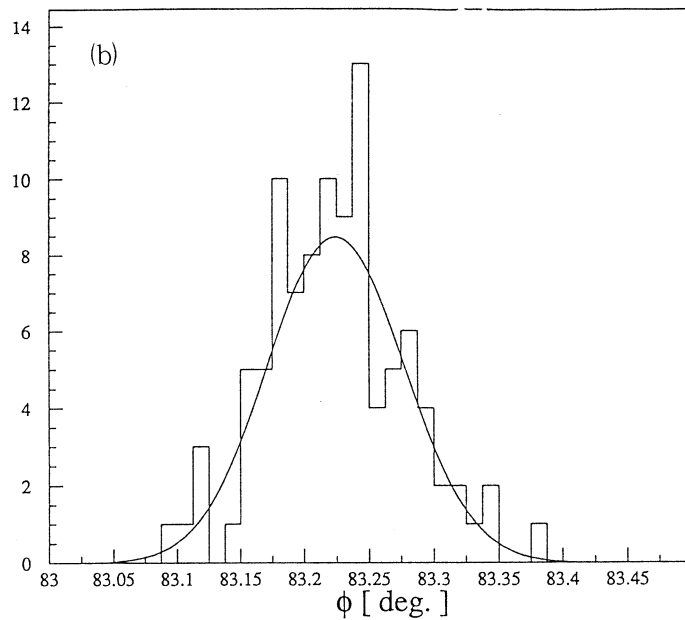
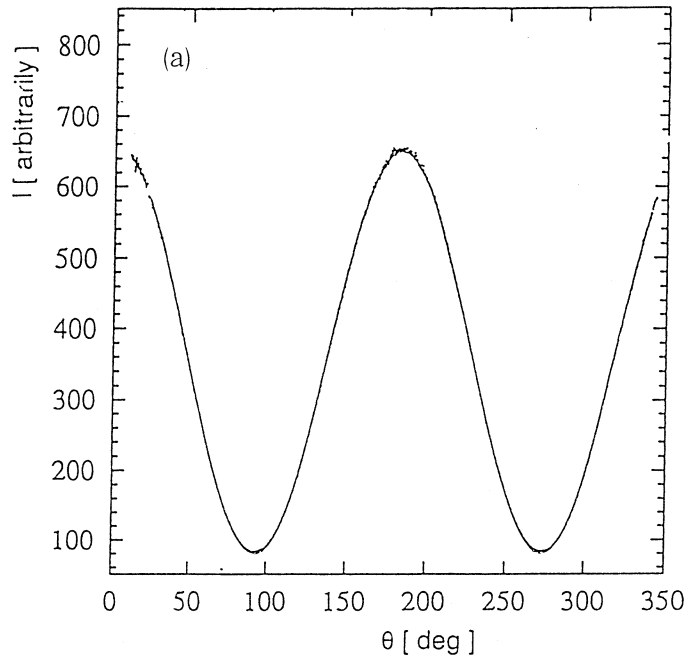
Rb原子の気体厚さを測定する際に必要なファラデー回転角の測定精度を見積もった。そのためファラデー回転角 Φ_0 の気体厚さ、波長依存性を付録の式を用いた予備計算から求めた。その結果を第2図に示す。この結果を見ると、共鳴線の780nm近傍では波長の誤差の影響が角度に大きく出てしまう。そのため、波長が不安定なときでもあまり影響のない共鳴線から0.5nm程度離れた領域でも測定できるようにする必要がある。しかし、この場合は回転角が小さいので角度の誤差を 0.1° 以内にする必要がある。



第2図 Rbファラデー回転角 Φ_0 の予備計算。

Rbファラデー回転角の気体厚さ、波長依存性を示してある。磁場を2000Gaussに固定した気体厚さ(図中のNL)を 1×10^{13} 個/cm²から 1×10^{14} 個/cm²まで変化させて計算してある。気体厚さが大きくなるほど、また、波長が共鳴線(磁場のないときで780.023nm)に近いときほど回転角が大きくなる。

検光子の回転角を小さく変化させながら多くの点でデータをとるために、ステッピングモーターを内蔵した検光子を使用しパルスを読み込ませ角度情報に、フォトダイオードの出力をADCへ読み込ませ強度情報にして50Hzでゲートをかけてコンピュータにデータを取り込んだ。この方法では検光子が 360° 回転する間に3500点のデータ点が得られる。角度



第3図 fittingによる誤差および系統的誤差。

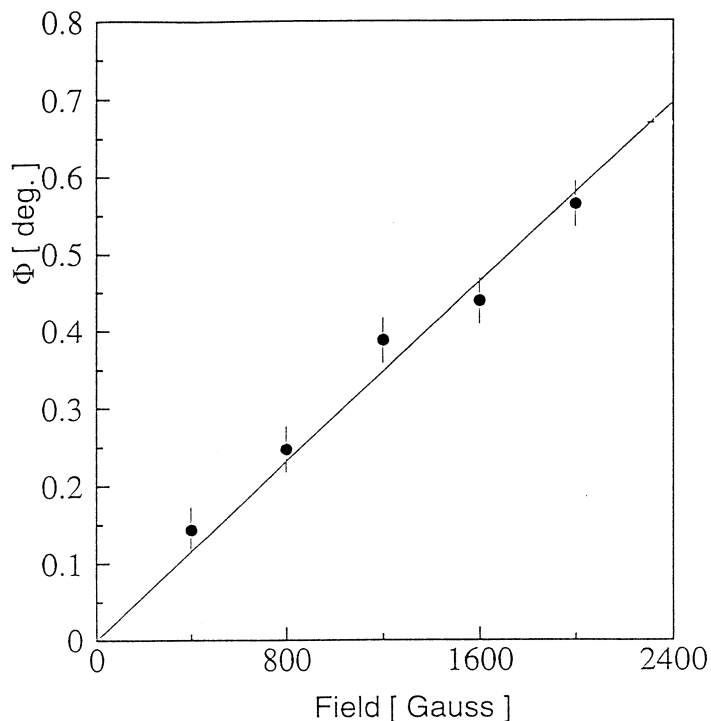
- (a) 検光子を回転したときのダイオードレーザー光の強度変化を示している。改良前に比べて精度が1桁良くなった。0.01°以下の精度が実現した。
- (b) 100回測定したときの測定角度の分布を示してある。統計が正規分布に従うとして gaussian で fitting した。

の測定精度は 0.01° となった。この際に、精度を上げるため様々な改良を行った⁶⁾。

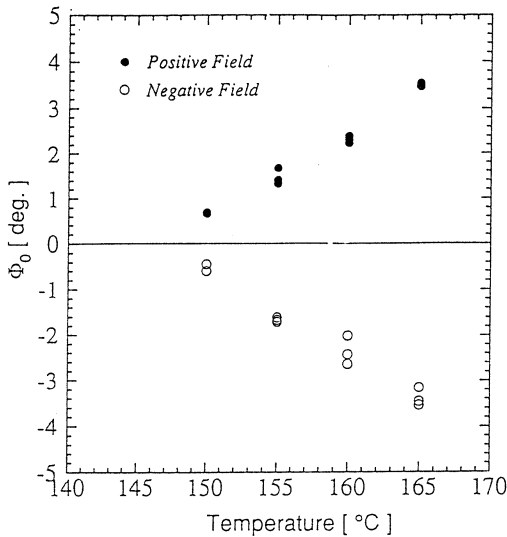
第一に、室内空調用エアコンなどの振動の影響を評価し、対策を講じた。第二に、検光子の首振り運動に起因するプローブ光の正弦波からのずれを、検光子とフォトダイオードの距離を最大限近づけることで解決した。第三に、検光子とフォトダイオードを同電位とすることやダイオードレーザーとその電源の距離を遠くすることでノイズの影響を抑えた。第四に、磁場をかけた時に観測されたダイオードレーザー光の移動の原因が、架台のたわみによるものであることを見つけ、ソレノイドコイルとポールピースを結ぶねじをきつく締めることで取り除いた。第2図に改良後の強度変化の fitting の誤差と、測定回数による系統的誤差を示した。

また、Rbの減偏極が起こらないようにRbセル壁にコーティングを施した。コーティングは、ジメチルジクロロシラン (10ml) と水 (5 ml) を1時間反応させた。その後内部を真空にして24時間 160° でベーキングを行った。

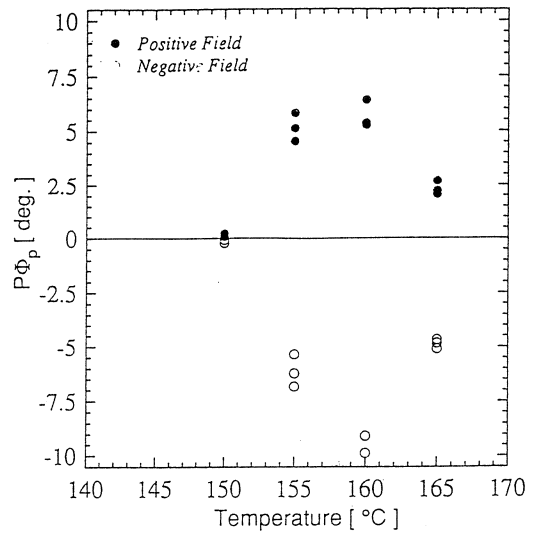
§ 4. Rb 原子の気体厚さ、偏極度の測定



第4図 ガラスのファラデー回転角の測定結果。
磁場に対するガラスのファラデー回転角を示した。磁場の正方向負方向での回転角を測定し、角度の絶対値の平均値をとり最小自乗法により線形 fitting を行った。



第5図 Rb ファラデー回転角 Φ_0 の測定結果。
温度を変えながらファラデー回転角 Φ_0 を測定した。横軸が温度、縦軸がファラデー回転角である。白丸が負方向の磁場、黒丸が正方向の磁場でいずれも大きさは2000Gaussである。

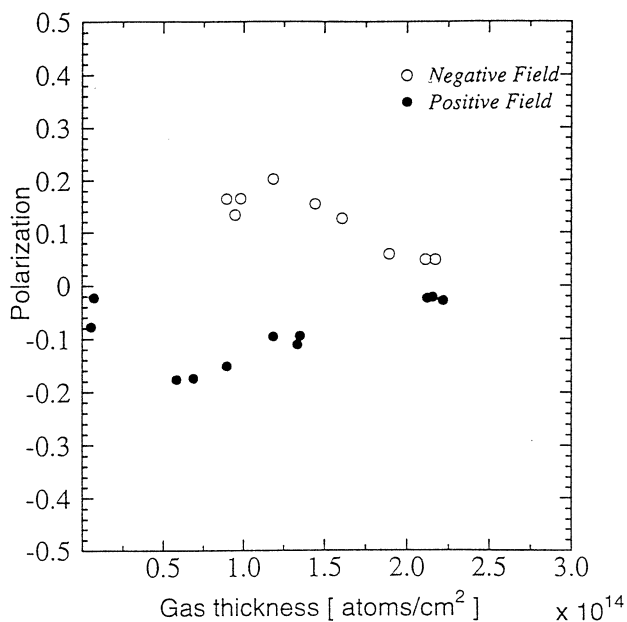


第6図 Rb 偏極角 $P\Phi_p$ の測定結果。
横軸が温度、縦軸が偏極に関する角度 $P\Phi_p$ である。磁場の条件は第5図と同じである。

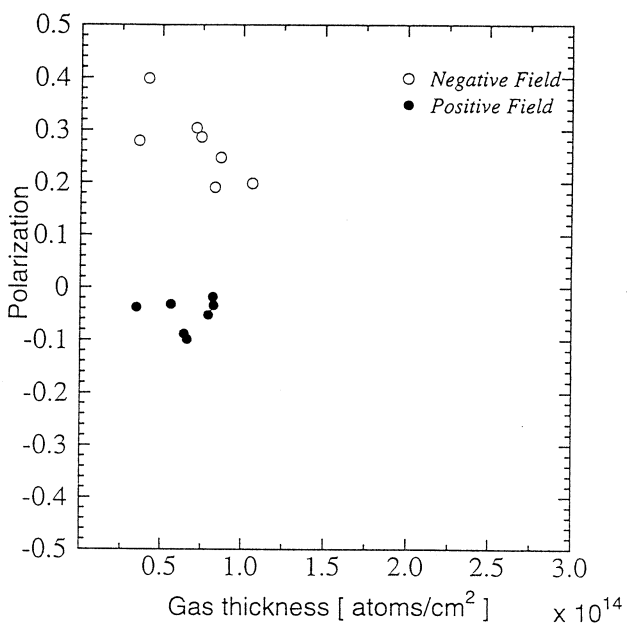
Rb 原子のファラデー回転角を測定する前にバックグラウンドとなる Rb セル（パイレックスガラス）のファラデー回転角を測定した。磁場はプローブレーザーの方向を正の方向として ± 2000 Gauss まで ± 400 Gauss ずつ替えた。回転角は磁場が正と負の両方向で平均をとった。回転角を磁場の強さの関数として最小自乗法で fitting した結果を第4図に示す。回転角は磁場に比例し、その結果からベルデ定数が $V = 0.00024$ [deg./Gauss/cm] と求まった。磁場が 2000 Gauss、セルの厚さが 1.4 cm のときのセルによる回転角は、 0.56° となった。なお、ガラスのファラデー回転角は Rb と比べて波長依存性が弱いため、波長のモニターはせずに測定を行った。

Rb のファラデー回転角の測定方法は、磁場をかけたときとかけないときで角度を測定しその差から Φ_0 を求め、レーザーを入射したときとしないときで角度を測定しその差と Φ_0 から $P\Phi_p$ を求める。その際に波長計での波長の読み値は ± 0.05 nm 程度のふらつきがある。データ解析では波長は測定時間（76秒）の平均をとった。

Rb セルの温度を変えて Rb のファラデー回転角 Φ_0 を測定した結果を第5図に、 $P\Phi_p$ を測



第7図 Rb 偏極度の気体厚さ依存性。
 気体厚さに対する偏極度の関係を示した。磁場の条件は第5図と同じで、正負の磁場で偏極度の大きさの非対称が見られる。



第8図 Rb 偏極度の気体厚さ依存性（共鳴線に合わせた後）。
 磁場をかけゼーマン分離した後の共鳴線に波長を合わせたときの気体厚さと偏極度の関係。磁場が -2000Gauss で波長を合わせた。偏極度の非対称性が第7図よりも大きい。

定した結果を第6図に示す。 Φ_0 の測定ではガラスの回転角があるので、この結果から 0.56° を差し引く。磁場は ± 2000 Gaussとし、波長は 780.39 ± 0.03 nmであった。この結果から計算した気体厚さと偏極度の関係を第7図に示す。このときのTiサファイアレーザーの強度は0.4Wである。偏極度は、0.2程度と非常に小さい。この図では、磁場の正方向と負方向で偏極度の非対称が現われている。これは磁場によりRb原子準位にゼーマン分離が起きたため共鳴波長がその分ずれたことによると考えられる。よって、ゼーマン分離後の一方の準位に波長をより近づけてやれば偏極度が上がるはずである。

このことを考慮して、負方向の磁場に波長を合わせながらTiサファイアレーザーの強度を同じにして再度測定を行った。気体厚さと偏極度の関係を示した結果を第8図に示す。この結果では、前述した推論が正しいことがわかり偏極度の非対称が現われ、負方向磁場での偏極度は0.4となった。

§ 5. 今後の課題

ファラデー回転角から気体厚さを決めるためには、波長の精度良い測定が必要となる。しかし、波長計からの反射が半導体レーザーに戻り、新たな発振機構が生じてダイオードレーザーの波長に不安定性を引き起こすことがわかった。またこの反射により、ダイオードレーザーの波長の制御も行えず偶然現われた波長で測定を行っていた。この反射波がダイオードレーザーに戻ってくるのを防ぐため反射波だけ減衰させる光学フィルターを作ることによって精度良くしかも波長の制御が行えるようになると考えている。

また偏極度をもっと大きくするため、コーティングやレーザー光の広がりによる偏極度への影響を調べる必要がある。また、偏極の緩和時間と偏極度の関係を調べる必要もある。

われわれの測定では、現在はコンピュータ制御を行わず人間によって磁場の方向などの条件を変えながらデータを取り込んでいる。作業の効率化、データの精度の上昇のためにコンピュータ制御によって測定を全自動化する必要がある。

最後にまとめを行う。ファラデー回転角を精密にとる測定系を制作した。精度は $\pm 0.01^\circ$ であった。ガラスのファラデー回転角を測定し、ベルデ定数が $V = 0.00024$ [deg./Gauss/cm]、回転角は、 0.56° となった。現在までのところ、密度 $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ の気体厚のRb原子に対して0.4の偏極度が得られている。

今回の実験を遂行するにあたり、必要な機器や有用な情報を提供していただいた KEK の森

義治教授，サイクロトロンの方々に感謝いたします。実験備品を管理し，必要に応じて貸して頂いたマシングループの方々に感謝いたします。日常的に計算機の管理をしていただいた計測グループの方々に感謝いたします。

付録 ファラデー回転角の計算

ここでは，ファラデー回転角の計算を行うプログラムに必要な式のみを載せる。より詳しくは，文献4)を参照。

ファラデー回転角は，次の式で表される。

$$\Phi = \frac{\pi l}{\lambda} (n^+ - n^-) \quad (1)$$

λ : 波長

l : 媒質の波長

n^+ : 右円偏光屈折率

n^- : 左円偏光屈折率

ここでは強い磁場の場合に限る（磁場の存在しないときは，文献5)を参照）。

右円偏光，左円偏光に対応する屈折率は，

$$\begin{aligned} n^+ - 1 = & \frac{g_{5p} c N_0}{8 \pi^2} \left[\frac{\lambda_{14}^2 x_{14}}{\nu_{14} (1 + x_{14}^2)} \frac{1}{2} (1 - P) \left(\frac{1}{6} \right) \right. \\ & + \frac{\lambda_{17}^2 x_{17}}{\nu_{17} (1 + x_{17}^2)} \frac{1}{2} (1 - P) \left(\frac{1}{6} \right) \\ & \left. + \frac{\lambda_{28}^2 x_{28}}{\nu_{28} (1 + x_{28}^2)} \frac{1}{2} (1 + P) \left(\frac{1}{6} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n^- - 1 = & \frac{g_{5p} c N_0}{8 \pi^2} \left[\frac{\lambda_{23}^2 x_{23}}{\nu_{23} (1 + x_{23}^2)} \frac{1}{2} (1 + P) \left(\frac{2}{6} \right) \right. \\ & + \frac{\lambda_{26}^2 x_{26}}{\nu_{26} (1 + x_{26}^2)} \frac{1}{2} (1 + P) \left(\frac{1}{6} \right) \\ & \left. + \frac{\lambda_{15}^2 x_{15}}{\nu_{15} (1 + x_{15}^2)} \frac{1}{2} (1 - P) \left(\frac{1}{6} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

と書けるので，ファラデー回転角は，

$$\Phi = \frac{\pi l}{\lambda} (n^+ - n^-)$$

$$= \Phi_0 + P\Phi_P \quad (4)$$

ここで,

$$\Psi_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2 x_{ij}}{\nu_{ij} (1 + x_{ij}^2)} \quad (5)$$

$$x_{ij} = \frac{\nu_{ij} - \nu}{\gamma} \quad (6)$$

ν_{ij} : 微細構造準位 i, j 間の遷移振動数

γ : γ は自然数, ドップラー幅, 微細構造幅, 圧力幅などの崩壊幅で以下の式となる。

$$\gamma = \frac{\Delta\nu}{2} \quad \Delta\nu : \text{エネルギー幅} \quad (7)$$

として,

$$\Phi_0 = \frac{g_{5P} c N_0 l}{8 \pi \lambda} \left[\frac{1}{6} (\Psi_{14} - \Psi_{23}) + \frac{1}{12} (\Psi_{17} - \Psi_{26}) + \frac{1}{4} (\Psi_{28} - \Psi_{15}) \right] \quad (8)$$

$$\Phi_P = \frac{g_{5P} c N_0 l}{8 \pi \lambda} \left[\frac{1}{4} (\Psi_{28} - \Psi_{15}) - \frac{1}{6} (\Psi_{14} - \Psi_{23}) - \frac{1}{12} (\Psi_{17} - \Psi_{26}) \right] \quad (9)$$

である。(4)式から, 偏極度 P が,

$$P = \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_P} \quad (10)$$

(8)式から, 気体厚さ $N_0 l$ が

$$N_0 l = \frac{8 \pi \lambda}{g_{5P} c} \left[\frac{1}{6} (\Psi_{14} - \Psi_{23}) + \frac{1}{12} (\Psi_{17} - \Psi_{26}) + \frac{1}{4} (\Psi_{28} - \Psi_{15}) \right]^{-1} \Phi_0 \quad (11)$$

と求まる。

参 考 文 献

- 1) W. Happer : Rev. of Mod. Phys. **44** (1972) 169.
- 2) L. W. Anderson and T. Walker : Nucl. Instr. Meth. **A316** (1992) 123.
- 3) D. R. Swenson and L. W. Anderson : Nucl. Instr. and Meth. **B29** (1988) 627.
- 4) Y. Mori, K. Ikegami, A. Takagi and S. Fukumoto : Nucl. Instr. and Meth. **220** (1984) 264.
- 5) F. strumia : Nuovo Cim. **B44** (1966) 378.
- 6) 横川民雄 : 修士論文 (1997).

中性子検出器用吸収体 ^{209}Bi の中性子に対する減衰率の測定

核理研, 山形大理学部*, 理学研究科物理**
サイクロトロン RI センター***

吉田耕平・木野幸一・遠藤卓哉

齋藤悌二郎・上野博昭*

中川武美**・藤井 優**

相澤 武**・松永光暢**

寺川貴樹***

§ 1. 目 的

我々はこれまでの (e, e' n) 実験で中性子検出器として NE213 を用いる際, ターゲットから中性子と同時に発生する γ 線を除去するために, ^{209}Bi 板の吸収体を使用している。

この吸収体は γ 線のみならず中性子をも減衰させる。そのため, この減衰率のエネルギー依存性を, 8MeV 以下の中性子に対しては ^{252}Cf の線源を用いて実験的に求めてきた。^{1, 2)}

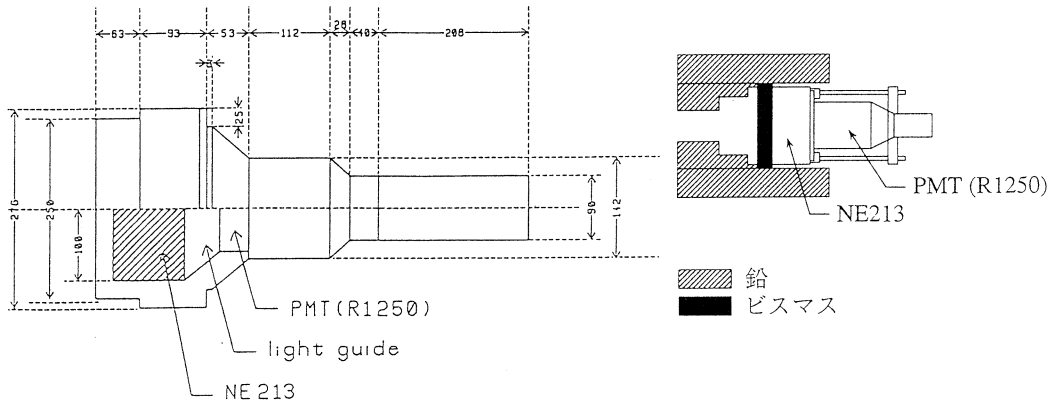
今回, 8MeV 以上の中性子に対する減衰率のエネルギー依存性を, $^9\text{Be} (p, n)^9\text{B}$ 反応によるスペクトルを用いた TOF 測定で実験的に求めることを目的としている。

§ 2. 実 験

実験はサイクロトロン RI センターにおいて, 30MeV の陽子ビームを用いた $^9\text{Be} (p, n)^9\text{B}$ 反応より得られる連続中性子線を用いて行なった。

発生した中性子線は ^9Be ターゲットから 10.5 m の距離に置かれた (e, e' n) 用の中性子検出器で検出する。この検出器は直径 18 cm, 厚さ 10 cm, 内容積 2.5 l の液体シンチレータ NE213 と PMT で構成されている。

液体シンチレータの前面には 20 cm 厚の鉛のコリメータと ^{209}Bi 板を設置する。 ^{209}Bi を設置しない時と, 2 cm, 4 cm, 6 cm 厚のものを設置した時で測定を行ない, 中性子の減衰の割合を求める。



第1図：中性子検出器の形状。

第2図：中性子検出器の遮蔽。

§ 3 解析方法

3.1 中性子- γ 線分離

中性子検出器では中性子だけでなく γ 線も検出される。中性子と γ 線はその発光特性により分離することができ、その方法には2通りある。

1. PSD (Pulse Shape Discriminator) モジュールによる方法

これは中性子と γ 線の作るパルスの立ち下がりの違いを検出するもので、PSDモジュールの波形弁別時間情報と中性子検出器からのlinear信号の波高値情報との2次元プロットを作って中性子部分と γ 線部分を区別する。

2. 2つのADCを使う方法 (Charge Comparison)

これは、中性子と γ 線とで、中性子検出器からのlinear信号の全電荷に対するtail部分の割合が異なることを利用する方法である。一方のADCでは全電荷を、他方のADCではtail部分の電荷を積分するようにゲート調整を施し、その2次元プロットで中性子部分と γ 線部分を区別する。

本実験では1の方法で分離し、2の方法で確認をした。

3.2 γ -flash

次節で述べるTOF法により中性子のエネルギーを決定するためには、TOF距離に対応する時間基準が必要である。この時間基準として用いることができる事象として、 γ -flashがある。 γ -flashは電子の非弾性散乱で励起された標的核の崩壊に伴う γ 線やターゲット中での制動輻射によるものであり、 γ 線は光速で中性子検出器に届くことから、TOF上に線スペクトルと

して現れる。よって、目的中性子事象の測定 TOF と γ -flash の測定 TOF との差に γ 線が TOF 距離を走る時間を加えれば、これが目的中性子事象の TOF 距離に対応する TOF となる。

3.3 TOF 法による中性子エネルギーの決定

中性子の運動量を p 、静止質量を M_n とするとエネルギー E は

$$E = \sqrt{M_n^2 + (pc)^2} - M_n$$

また中性子の速さを v 、 $\beta = v/c$ とすると

$$(pc)^2 = \frac{(M_n \beta)^2}{1 - \beta^2}$$

これから、 $t = L/v$ として

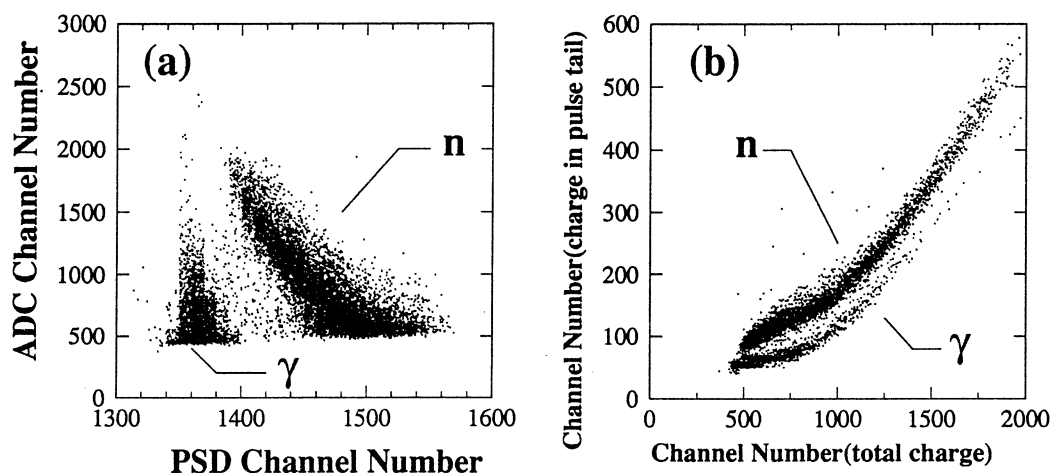
$$E = M_n \left\{ t \sqrt{\frac{1}{t^2 - (L/c)^2}} \right\}$$

が成り立つ。ここで t は中性子の飛行時間、 L は飛行距離である。上式より、TOF スペクトルで得られた飛行時間 t から中性子エネルギーが求められる。

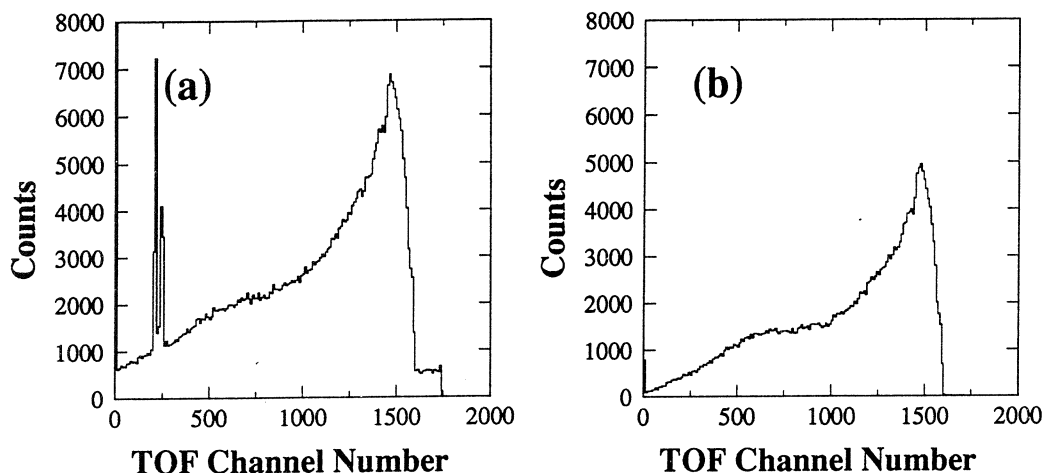
§ 4 結果及び議論

4.1 中性子- γ 線分離

3.1で述べた二つの方法を用いて γ 線事象を分離した。第3図(a)に PSD モジュールを用いた場合、(b)に Charge Comparison 法を用いた場合の分離の様子を示す。両方法ともに、中性子事象と γ 線事象とをはっきりと分離することができている。第4図(a)(b)に γ 線事象除去前後の TOF 分布を示す。



第3図： n/ γ 分離 (a) PSD モジュールによる分離、(b) Charge Comparison 法による分離。



第4図： TOF分布 (a) γ 線除去前, (b) γ 線除去後。

4.2 γ -flash

第5図に γ 線事象の TOF 分布を示す。200ch から250ch にみられる 2 本の γ -flash のうち、左側のもは散乱槽にビームハローが当たってできたものと考えられ、右側のもが本物である。また、この250ch 付近の γ -flash は 1 バースト後のものであり、真の γ -flash は2000ch 以上のところであって今回の TOF スペクトルには現れてこない。したがって、250ch 付近の γ -flash に今回の実験の 1 サイクル分のチャンネル数を加えることにより、真の γ -flash の位置を決定した。

4.3 中性子エネルギー分布と減衰率

TOF 法によって得られた中性子のエネルギー分布を第6図に、減衰率を第7図示す。減衰率は、 ^{209}Bi 板を設置しない時に対する ^{209}Bi 板の厚さが 2 cm, 4 cm, 6 cm の時の割合いを 1 から引いたものである。

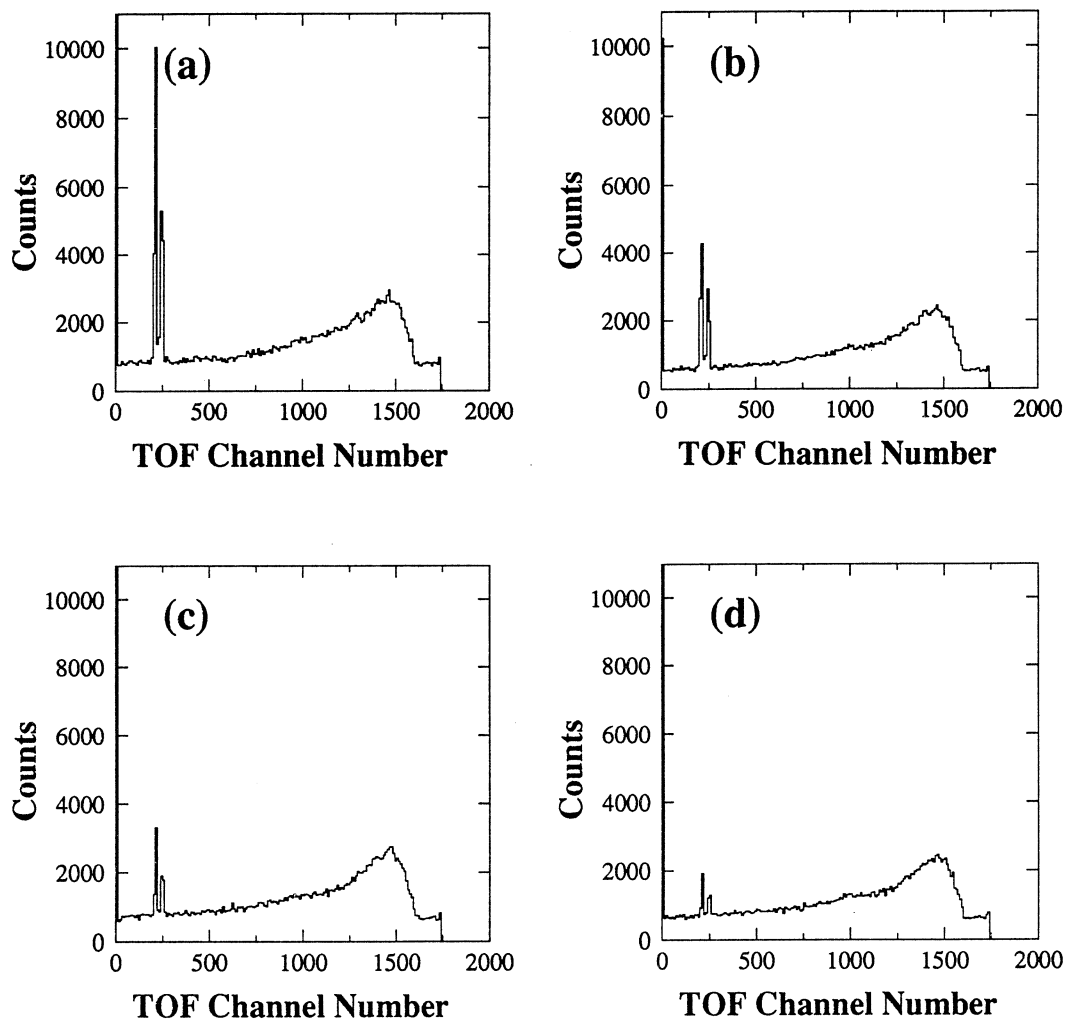
3つの減衰率の分布を比べると、 ^{209}Bi 板の厚さが増すほど中性子エネルギーの低いところで中性子の減衰が大きくなってゆくの分かる。しかし全対的に、急激な変化や凸凹はなくほぼ一定の減衰率0.3を示しており、構造はみられない。

したがって、 ^{209}Bi 板が γ 線の吸収体として適しているといえる。

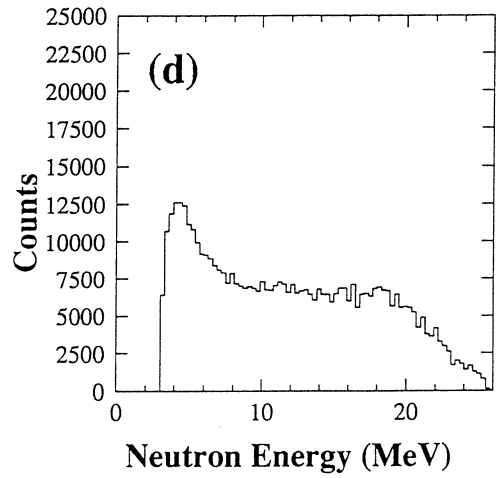
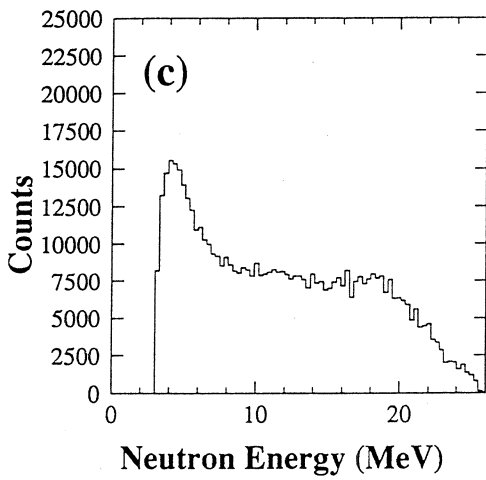
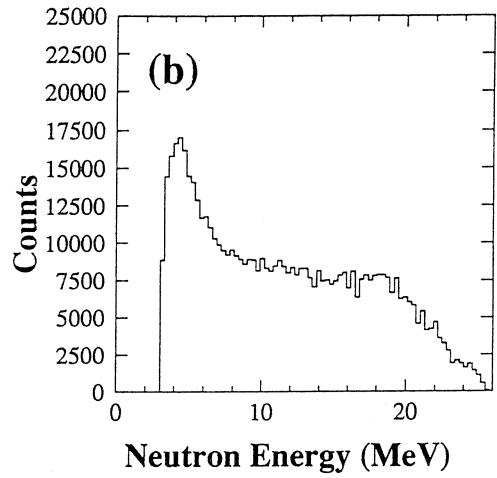
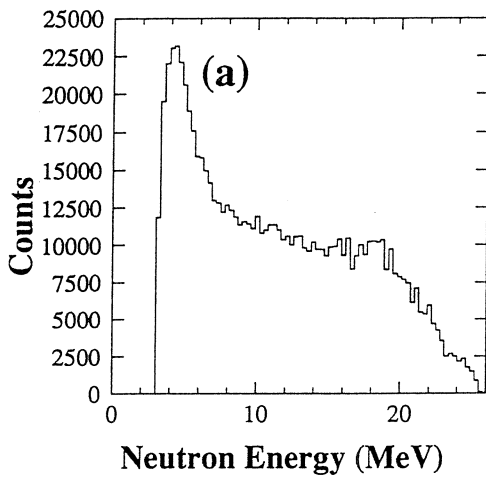
§ 5. まとめ

今回、30MeVの陽子ビームを用いた ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応より得られる連続中性子線を用いて、 ${}^{209}\text{Bi}$ 板の吸収体による中性子の減衰率のエネルギー依存性を測定した。

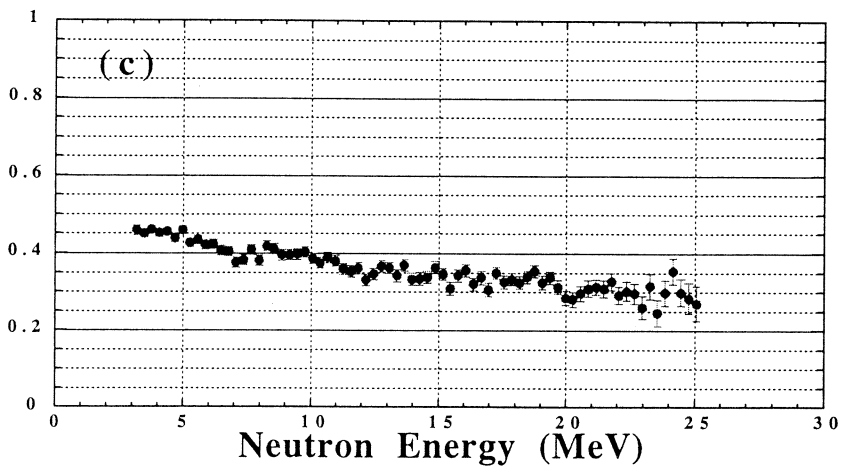
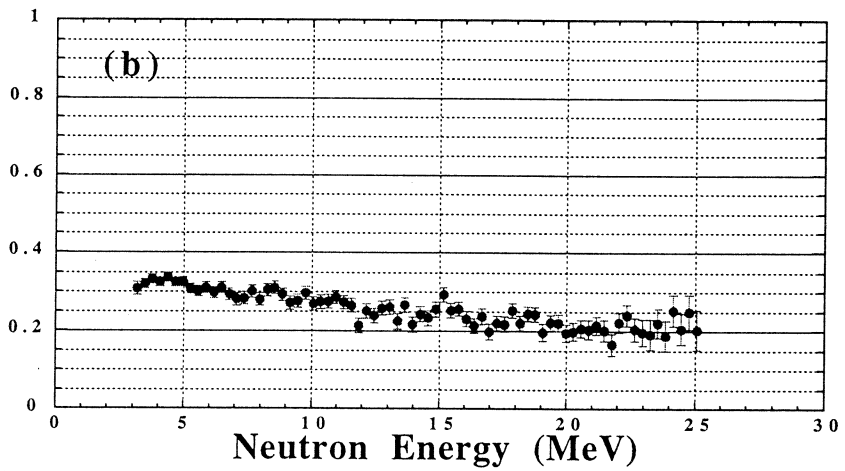
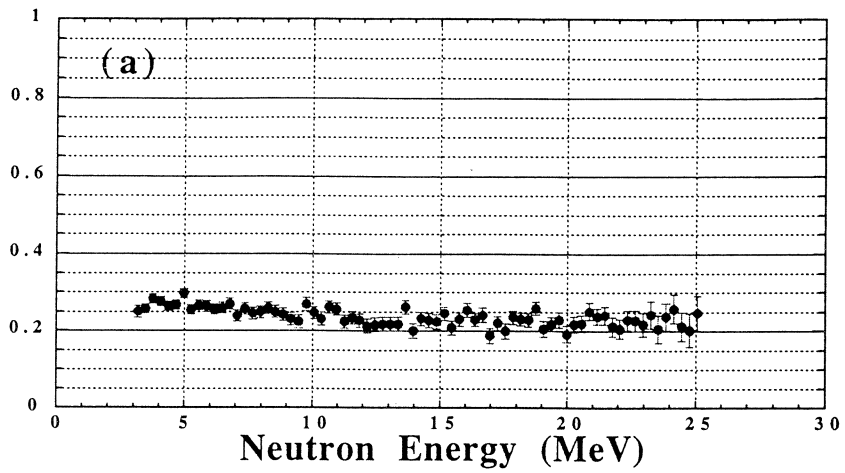
中性子エネルギーが低くなるにしたがって、減衰の度合いが若干大きくなる傾向にあるが、ほぼ一定の値0.3を示しており、構造がなく γ 線の吸収体として適していることが分かった。



第5図: γ -flash (a) ${}^{209}\text{Bi}$ 板なし (b) 2 cm (c) 4 cm (d) 6 cm。



第6図：中性子エネルギー分布。(a) ^{209}Bi 板なし，(b) 2 cm，(c) 4 cm，(d) 6 cm。



第7図：中性子の減衰率 (a) 2 cm (b) 4 cm (c) 6 cm。

参 考 文 献

- 1) 高桑智恵：修士論文，東北大学，1990.
- 2) 高久圭二他：核理研研究報告**22**（1989）1.

IV. 加 速 器 稼 働 状 況

平成8年度マシン報告

マシングループ

栗原 亮・浦澤茂一・小山田正幸

柴崎義信・高橋重伸・中里俊晴

概 況

今期は第一実験室 R I 照射の共同利用を11月に再開した。実験はライナック故障によるマシンタイムの補償をおこなわない方針でのぞんだ。

課題採択は昼間だけの照射実験を12シフト採択した。スケジュールは放射線安全管理のドアインターロック点検, 各系の試運転, 不具合箇所の調整と修理, 前日にライナックの総合運転, 実験日とした。また, ライナック運転は故障軽減のためクライストロン室内の温度を25℃以下で運転するようにしている。

ライナックの性能はクライストロンパルサーの安定化回路を動作させ, 第一実験室にエネルギー65MeV で平均電流90 μ A である。第二実験室は第二実験室 STB リング建設, および第二電磁石室の偏向系の移設と配線・配管工事でビーム加速を休止している。

マシンタイム実施状況

前期と同様に実験停止期間は除湿器を本体室で稼働させ湿度対策とした。総合運転では停止後のライナック加速管へ最初の RF 入力時にガス放出がおき, これはクライストロンパルサー1号機で RF を供給される加速管の方がガス放出が大きい。これがおさまってから, エミッション電流が0.6A に達することを確認し実験にのぞんだ。

実験は同時に起きた空気源故障と非常停止スイッチの不良による延期が1件, ガングリッドパルサー高圧電源故障による中止の1件があった。中止した実験は通常の課題採択どおり補償した。

第1表にマシンタイム実施状況を示す。(マシングループ調べ)

第1表 平成8年度 マシントイム実施状況。

課 題	割 当	実 施	中 止	合 計
R I	12	12	1	13
合計	12	12	1	13
課題シフト数	12	12	0	12

保守状況

第二電磁石室関連ではSTBリング建設での第二実験室へのⅡ系分析系とSTBリングへのビーム供給ラインのⅢ系分析系の組み替え工事を行った。Ⅱ系分析系は既成のダクトと分析電磁石およびQ電磁石を使い移設した。また、第二実験室へのビーム輸送系Ⅱ系は従来の構成で移設した。Ⅲ系分析系は既成の分析電磁石と新Q電磁石を用い構成した。真空関係はアルミ製真空ダクトとスリットを更新し、新イオンポンプを用いた。Ⅱ・Ⅲ系分析系ダクトへの冷却水配管類は配管室のヘッダーから配管した。また、給電線は配管室の中継端子盤から各電磁石まで新設ラダー上に布設し接続した。

真空系は本体室設置のイオンポンプケーブルの不良個所を交換した。および第二実験室内の粗引きとビームダクトの移設をおこなった。ECS系のコアモニターダクトは真空リークのため交換した。

ガングリッドパルサーを半導体パルサーに変更し、操作法は従来と同様にした。この系のトリガは光ケーブルで伝送しガンパルサー高圧ステージ側で変換増幅している。出力パルス幅は入力トリガパルス幅、出力の可変は制御室の直流電源電圧で制御する。ノイズによる誤動作は変換増幅器を遮蔽すればなくなる。現在仮シールドで使用している。

空気源のコンプレッサーが寿命のため交換した。また電気室からコンプレッサー室への電源供給線に電圧降下があり、この配線を張り替えた。原因は配線途中での接続不良であった。

冷却系は第二電磁石室内のⅡ系とⅢ系配管のアルミパッキン交換工事を行った。加速管A1フォーカスコイルの絶縁用ゴムパイプからの水漏は、全数(22箇所)を交換修理した。

モニター関係ではA部最後のビームロスモニター検出器の故障があり、ビームロスが少ない箇所から流用して使用している。ビームスクリーンモニターは出入り検出器の位置ズレによる制御不良があった。

クライストロンパルサー3, 4, 5号機に新型クライストロンの規格に合わせた、ソフトスタート回路とイオンポンプ遅延停止回路(設定30分)を取付けた。他のクライストロンパルサー

1, 2号機は対応済みである。クライストロンパルサー1号機は制御用NFBの交換を行った。

立体回路系真空系は本体室導波管冷却配管接続部改修工事を行った。これは長年使用してきた導波管の冷却配管接続部分の変形による流量低下と水漏れを防止する目的で行った。

立体回路系加圧系は導波管の変形による損失を軽減するため、クライストロン室の導波管H・Eバンドと直線導波管、及び3dB分割器の交換工事を行った。この導波管の冷却配管は銅パイプである。また冷却管の変形による冷却効果の改善工事に従来どおり銅パイプを使用した。

立体回路系は透過波検出の方向性結合器や真空導波管、および変形による伝送損失の低減を考慮し整備する。また、加圧系と真空系ダミーロードの更新を考えている。

ECS電磁石の配線の端子接続部分の錆びはネジの材質を真鍮に変え交換した。

本体室の全クイックバルブの駆動電源線と信号取りだし線は線材に放射線ダメージがあり交換を行った。クイックバルブは動作に確実性がなく、クイックバルブインターロック回路の負論理回路への変更とクイックバルブの更新を考慮している。

本体室の照明器具交換工事および第二電磁石室の照明器具と配線交換工事を行った。照明器具は放射線による損傷および部品補充がに問題があり更新した。配線は放射線による絶縁被覆の損傷が著しいので更新した。

今期は本体室の残留放射線レベルが低く共同利用再開前にライナック運転（電子ビーム加速）の体勢を整える改修と修理が主であった。

今後ライナック運転が本格化すれば消耗品の電子銃やサイラトロンおよびクライストロンの購入も必要である。設備では老朽化の進んでいる冷却塔の更新が延期されているのでこれも早く決着を付けたい。積雪時のクライストロン室の水漏れ箇所は六シーズン過ぎたが未だ修理はされていない。保全のためクライストロン室屋上の雪かきを事前におこなったが、安全性と故障の点から、今後は運転停止も選択肢に入れる。

冷却系に限らず、クライストロン室の温度上昇やマシン関係の異常アラーム下でのライナック運転は故障の拡大があるため、早めに停止するよう協力をお願いしたい。現在、エネルギー変更を伴わない実験は連続でおこなうことが可能です。

ライナック運転の条件に通常と異なる希望がある場合は早めに相談してください。また、放射線被爆の可能性のある作業は「マシン停止後24時間以上おいてから行う」のが原則になっています。

加速器の関連知識が豊富であった中里俊晴氏が12月末日をもって退職されました。新分野での活躍を期待しています。

V. 論 文 リ ス ト

論文リスト

核理研共同利用の成果を核理研研究報告以外の学術雑誌に掲載された論文（1996年1月～12月）の題目を収録しました。

I 原子核物理

1. Photoexcitation Mechanisms Investigated through the Fission Channel.

J. D. T. Arruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe, O. Konno, M. Oikawa, S. Simionatto, M. L. Yoneama, J. F. Dias, A. Deppman, B. S. Bhandari, V. P. Likhachev and A. C. S. Lima : *Phys. C54* (1996) 3294.

II 放射化学

1. Production of Radioactive Fullerene Families Using Accelerators.

T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki and K. Kikuchi : *Mater. Sci. Eng. A MSA 217* (1996) 38.

2. Insertion of Be Atoms in C₆₀ Fullerene Cage : Be@C₆₀.

T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Ohno, Y. Maruyama, Y. Kawazoe, K. Sueki and K. Kikuchi : *Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 3522.

3. Two Stage Implantation Reaction Model in Metal β -Diketonates.

K. Yoshihara, A. Miyakawa, M. Homma and T. Sekine : *Radiochim. Acta* **73** (1996) 171.

4. Solid State Diffusion in Light Metals (I).

S.-I. Fujikawa : *J. Japan Inst. Light Met.* **46** (1996) 202.

5. Solid State Diffusion in Light Metals (II).

S.-I. Fujikawa : *J. Japan Inst. Light Met.* **46** (1996) 254.

III 加速器・測定器

1. The Tohoku University Stretcher-Booster Ring and Storage Ring Project.

M. Oyamada : *Proc. VI China-Japan Joint Symp. on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, Chengdu, China. 1996*, eds. Sun Guanqing and Li Zhengda (Sichuan Union Univ. 1996) p.78.

VI. 出版論文リスト

(1968~1997)

東北大学原子核理学研究施設が昭和42年10月に共同利用を開始して以来、平成9年までの研究成果のうち内外の学術誌および国際会議のプロシーディングスに発表された論文を集録したものである。

I 原子核物理	175
II 物性関係	198
III 中性子回折	200
IV R I 関係	211
V 加速器・測定器	237
VI 他研究機関での研究	244

I 原子核物理

1. Isobaric Analogue Resonances in Photoproton Reactions.

K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : Phys. Lett. **28 B** (1968) 30.

2. Electroexcitation of the 10.8-MeV ($1^-, T=0$) Level of ^{12}C and the 7.12-MeV ($1^-, T=0$) Level of ^{16}O .

Y. Torizuka, M. Oyamada, K. Nakahara, K. Sugiyama, Y. Kojima, T. Terasawa, K. Itoh, A. Yamaguchi and M. Kimura : Phys. Rev. Lett. **22** (1969) 544.

3. Photoproton Reactions through Isobaric Analogue States in ^{88}Sr and ^{90}Zr .

K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 800.

4. Study of Nuclear States in ^{60}Ni by Inelastic Electron Scattering.

Y. Torizuka, Y. Kojima, M. Oyamada, K. Nakahara, K. Sugiyama, T. Terasawa, K. Itoh, A. Yamaguchi and M. Kimura : Phys. Rev. **185** (1969) 1499.

5. Electroexcitation of the Giant Resonance in ^{12}C .

Y. Torizuka, A. Yamaguchi, K. Nakahara, M. Oyamada, T. Terasawa, K. Itoh, Y. Kojima and M. Kimura : Phys. Rev. **188** (1969) 1745.

6. Analogue States in (γ, p) Reactions on $N=50$ Nuclei.

K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : *Nuclear Isospin (Proc. Conf. Nuclear Isospin, Asilomar, 1969)* eds. J. Anderson, S. Bloom, J. Cerny, W. True (Academic Press, 1969) p. 125.

7. Analogue States in (γ, p) Reactions on Sn Isotopes.

K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : *ibid.* p. 131.

8. Isobaric Analogue States in (γ, p) Reactions on $N=82$ Nuclei.

K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : *ibid.* p. 137.

9. Excitation of the Giant Resonance in ^{12}C by Inelastic Electron Scattering.

Y. Torizuka, A. Yamaguchi, T. Terasawa, Y. Kojima, K. Nakahara, M. Oyamada, K. Itoh, A. Nakada, S. Mitsunobu and M. Kimura : Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 874.

10. Study of Nuclear States in ^{40}Ca by Inelastic Electron Scattering.
K. Itoh, M. Oyamada and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **2** (1970) 2181.
11. Coupling between Spin-Flip and Non-Spin-Flip Particle-Hole Pair States.
J. I. Fujita, M. Hirata and K. Shoda : Phys. Lett. **33 B** (1970) 550.
12. Excitation of the Giant Resonance in ^{12}C by Inelastic Electron Scattering.
A. Yamaguchi, T. Terasawa, K. Nakahara and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **3** (1971) 1750
13. The Deformations in ^{20}Ne , ^{24}Mg , and ^{28}Si from Electron Scattering.
Y. Horikawa, Y. Torizuka, A. Nakada, S. Mitsunobu, Y. Kojima and M. Kimura : Phys. Lett. **36 B** (1971) 9.
14. Determination of the Deformation in ^{12}C from Electron Scattering.
A. Nakada, Y. Torizuka and Y. Horikawa : Phys. Rev. Lett. **27** (1971) 745.
15. Electron Excitation of Low-Lying States in ^{208}Pb .
M. Nagao and Y. Torizuka : Phys. Lett. **37 B** (1971) 383.
16. $(e, e' p)$ Reactions on ^{207}Pb and ^{209}Bi through Isobaric Analog States and the Matrix Elements for the First-Forbidden β^- Decay.
K. Shoda, A. Suzuki, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase and S. Oikawa : Phys. Rev. C **3**(1971) 1999.
17. Study of the Matrix Element for β^- Decay of ^{138}Ba , ^{141}Ce and ^{148}Pm by the $(e, e' p)$ Reaction.
K. Shoda, A. Suzuki, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, S. Oikawa and B. N. Sung : Phys. Rev. C **3** (1971) 2006.
18. Isobaric Analogs in the $(e, e' p)$ Reaction with ^{138}Ba , ^{140}Ce , ^{142}Nd , and ^{144}Sm .
K. Shoda, T. Saito, M. Sugawara, H. Miyase, S. Oikawa and A. Suzuki : Phys. Rev. C **4** (1971) 1842.
19. Determination of the Deformations in ^{24}Mg and ^{28}Si Nuclei from Electron Scattering.
A. Nakada and Y. Torizuka : J. Phys. Soc. Jpn. **32** (1972) 1.
20. Form Factors of the Monopole Transitions in ^{20}Ne by Inelastic Electron Scattering.
S. Mitsunobu and Y. Torizuka : Phys. Rev. Lett. **28** (1972) 920.
21. Giant Multipole Resonances in ^{90}Zr Observed by Inelastic Electron Scattering.

- S. Fukuda and Y. Torizuka : Phys. Rev. Lett. **29** (1972) 1109.
22. Determination of Deformations of ^{20}Ne and ^{28}Si .
Y. Horikawa, A. Nakada and Y. Torizuka : *Proc. Int. Conf. Nuclear Structure Studies using Electron Scattering and Photoreaction, Sendai, 1972*, Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University **5** (1972) Suppl. p. 7.
23. The Transition Charge Density of the 3_1^- State in ^{208}Pb .
M. Nagao : *ibid.* p. 121.
24. Transition Charge Density of Vibrational Nuclei.
K. Hosoyama, Y. Torizuka, Y. Kawazoe and H. Ui : *ibid.* p. 139.
25. Giant Multipole Resonances in Medium and Heavy Nuclei Observed by Inelastic Electron Scattering.
Y. Torizuka, Y. Kojima, T. Saito, K. Itoh, A. Nakada, S. Mitsunobu, M. Nagao, K. Hosoyama and S. Fukuda : *ibid.* p. 171.
26. Isobaric Analog Resonance Studied by the $(e, e' p)$ Reactions on Medium and Heavy Nuclei.
K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, A. Suzuki, S. Oikawa and J. Uegaki : *ibid.* p. 321.
27. Electron Scattering from ^{51}V .
G. A. Peterson, K. Hosoyama, M. Nagao, A. Nakada and Y. Torizuka : *ibid.* p. 399.
28. Photoproton Reaction on Sn Isotopes.
M. Sugawara, K. Shoda, T. Saito, H. Miyase, A. Suzuki, S. Oikawa and R. Bergere : Phys. Rev. C**5** (1972) 1705.
29. Photoprotons in Giant Resonance Region for ^{31}P .
H. Tsubota, N. Kawamura, S. Oikawa, M. Sugawara and K. Shoda : J. Phys. Soc. Jpn. **35** (1973) 330.
30. Isobaric Analogs in the $(e, e' p)$ reactions of ^{169}Tm and ^{181}Ta .
A. Suzuki, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, S. Oikawa and J. Uegaki : *Proc. Int. Conf. Photonuclear Reactions and Applications, Asilomar,*

1973, ed. B. L. Berman (Lawrence Livermore Laboratory, University of California 1973) p. 195.

31. The Photoproton Reaction on ^{181}Ta .

A. Suzuki, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, S. Oikawa, J. Uegaki, M. N. Thompson, K. J. F. Allen, H. J. Askin and B. N. Sung : *ibid.* p. 197.

32. Study of the $T_{>}$ Giant Resonance in ^{142}Nd with the $(e, e'p)$ Reaction.

T. Saito, S. Oikawa, K. Shoda, M. Sugawara, H. Miyase, A. Suzuki and J. Uegaki : *ibid.* p. 199.

33. Shell Model Description of Photoproton Spectra in Heavy Nuclei.

K. Shoda : *ibid.* p. 207.

34. Angular Distribution of Photoprotons from ^{209}Bi .

J. Uegaki, S. Oikawa, A. Suzuki, H. Miyase, T. Saito, M. Sugawara and K. Shoda : *ibid.* p. 209.

35. The Photoproton Reactions of Ni-Isotopes.

H. Miyase, S. Oikawa, A. Suzuki, J. Uegaki, T. Saito, M. Sugawara and K. Shoda : *ibid.* p. 553.

36. Similarities in Photoproton Spectra from ^{90}Zr and ^{91}Zr .

H. J. Askin, K. J. F. Allen, M. N. Thompson, K. Shoda, M. Sugawara, H. Miyase and B. N. Sung : *ibid.* p. 561.

37. Giant Resonances Other than E1.

Y. Torizuka, Y. Kojima, T. Saito, K. Itoh, A. Nakada, S. Mitsunobu, M. Nagao, K. Hosoyama, S. Fukuda and H. Miura : *ibid.* p. 675.

38. Core Excited 6^+ States in Nickel Isotopes Observed with Inelastic Electron Scattering.

K. Itoh, M. Oyamada and Y. Torizuka : *Phys. Rev. C* **7** (1973) 458.

39. Transition Charge Densities of the 2_1^+ , 2_2^+ States in ^{106}Pd and ^{114}Cd .

K. Hosoyama, Y. Torizuka, Y. Kawazoe and H. Ui : *Phys. Rev. Lett.* **30** (1973) 388.

40. Electroexcitation of Giant Multipole Resonances in ^{208}Pb .

M. Nagao and Y. Torizuka : *Rev. Lett.* **30** (1973) 1068.

41. Electroexcitation of the Giant Resonances in ^{16}O .

- A. Hotta, K. Itoh and T. Saito : Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 790.
42. Elastic Electron Scattering from the M7 Magnetization Density of ^{51}V .
I. C. Nascimento, J. R. Moreira, J. Goldemberg, S. Fukuda, T. Terasawa, T. Saito. K. Hosoyama and Y. Torizuka : Phys. Lett. **53 B** (1974) 168.
43. Isobaric Analog Resonances in $(e, e' p)$ on ^{90}Zr , ^{89}Y and ^{88}Sr .
K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : Nucl. Phys. **A 221** (1974) 125.
44. $^{90,91}\text{Zr}$ Photoproton Spectra and the Core-Excitation Model.
H. J. Askin, K. J. F. Allen, M. N. Thompson, K. Shoda, M. Sugawara, H. Miyase and B. N. Sung : Nucl. Phys. **A 220** (1974) 241.
45. Photoprotons from ^{27}Al .
H. Tsubota, N. Kawamura, S. Oikawa and K. Shoda : J. Phys. Soc. Jpn. **37** (1974) 17.
46. Electroexcitation of Rotational Bands in ^{26}Mg .
Y. Okazaki, K. Hayakawa, K. Nakahara, M. Oyamada, T. Terasawa and H. Saito : Phys. Lett. **55 B** (1975) 373.
47. (γ, p) Cross Sections and Isospin Splitting of the Giant Dipole Resonance in $N=50$ Nuclei.
K. Shoda, H. Miyase, M. Sugawara, T. Saito, S. Oikawa, A. Suzuki and J. Uegaki : Nucl. Phys. **A 239** (1975) 397.
48. Angular Distributions of Photoprotons from ^{208}Pb .
K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Miyase : Nucl. Phys. **A 246** (1975) 357.
49. Photoproton Reactions on ^{208}Pb .
K. Shoda, S. Oikawa, T. Saito, H. Miyase and A. Suzuki : Nucl. Phys. **A 246** (1975) 365.
50. Electroexcitation of Low-Lying States in ^{19}F .
M. Oyamada, T. Terasawa, K. Nakahara, Y. Endo, H. Saito and E. Tanaka : Phys. Rev. C **11** (1975) 1578.
51. Electroexcitation of Giant Multipole Resonances in ^{40}Ca .

- Y. Torizuka, K. Itoh, Y. M. Shin, Y. Kawazoe, H. Matsuzaki and G. Takeda :
Phys. Rev. C **11** (1975) 1174.
52. Quasielastic Electron Scattering and Giant Multipole Resonances in ^{116}Sn .
K. Hosoyama and Y. Torizuka : Phys. Rev. Lett. **35** (1975) 199.
53. New Giant Resonances.
Y. Torizuka : *Proc. Kawatabi Conf. New Giant Resonances, 1975*, Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University **8** (1975) Suppl. p. 1.
54. Quasielastic Multipole Resonances.
Y. Torizuka : *Proc. 3rd Seminar Electromagnetic Interactions of Nucl. at Low and Medium Energies, Moscow, 1975*.
55. Evidence for the Giant Monopole Resonance in ^{90}Zr .
S. Fukuda and Y. Torizuka : Phys. Lett. **62 B** (1976) 146.
56. The $T_>$ Giant Resonance of ^{181}Ta .
A. Suzuki, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, S. Oikawa, J. Uegaki, M. N. Thompson, K. J. F. Allen, H. J. Askin and B. N. Sung : Nucl Phys. **A 257** (1976) 477.
57. Elastic Electron Scattering from the M7 and M9 Magnetization Density of ^{209}Bi .
J. R. Moreira, I. C. Nascimento, K. Arita, J. Friedrich, A. Enomoto, T. Terasawa and Y. Torizuka : Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 566.
58. El Isobaric Analogue Resonances of Strongly Deformed Nuclei in (e, e' p) Reactions.
A. Suzuki and K. Shoda : Nucl. Phys. **A 260** (1976) 172.
59. Spin-Flip Transition Strength of $^{12}\text{C} (\gamma, \pi^+)^{12}\text{B}$.
K. Shoda, H. Ohashi and K. Nakahara : *Proc. Int. Conf. Meson-Nuclear Physics, 1976*, eds. P. D. Barnes, R. A. Eisenstein, L. S. Kisslinger (AIP, New York, 1976) p. 604.
60. Electroexcitation of Giant Multipole Resonances in ^{208}Pb .
M. Sasao and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **15** (1977) 217.
61. Elastic Magnetic Scattering from ^{51}V via nearly 180° .
A. Enomoto, S. Oguro, T. Nakazato, S. Ohsawa, H. Miura, A. Nakada, T.

- Saito, T. Terasawa, K. Nakahara, Y. Torizuka, Y. Kawazoe, A. Hotta and K. Arita. *Proc. Sendai Conf. Electro - and Photoexcitation, Sendai, 1977*, Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University **10** (1977) Suppl. p.173.
62. A Systematic Study of Photonuclear Cross Sections in the $1f_{7/2}$ Shell.
M. N. Thompson, R. E. Pywell, J. I. Weise, R. Farmer, J. Norbury, K. Shoda, M. Sugawara, H. Tsubota, T. Saito, H. Miyase, J. Uegaki, H. Ohashi, T. Tamae and T. Urano : *ibid* p. 241.
63. Photoprotons from ^{44}Ca , ^{45}Sc and ^{46}Ti .
S. Oikawa and K. Shoda : *Nucl. Phys. A* **277** (1977) 301.
64. The Chromium Photoneutron Cross Section.
J. Weise, M. N. Thompson, K. Shoda and H. Tsubota : *Aust. J. Phys.* **30** (1977) 401.
65. $T_{>}$ Giant Resonance in ^{142}Nd via the Reaction $^{142}\text{Nd} (e, e' p)$.
T. Saito, S. Oikawa, K. Shoda, M. Sugawara, H. Miyase and A. Suzuki : *Phys. Rev. C* **16** (1977) 958.
66. Photodeuteron Reactions on ^6Li and ^{14}N and Cluster-Model.
H. Taneichi, H. Ueno and K. Shoda : *Proc. Int. Conf. Nuclear Structure, (Contributed papers) Tokyo, 1977*, ed. Organizing Committee (International Academic Printing Co., Ltd., Tokyo, 1977) p. 141.
67. Electroexcitation of Rotational States in ^{23}Na .
Y. Okazaki, M. Kawamura, K. Takayama, K. Hayakawa, K. Nakahara and M. Oyamada : *ibid.* p. 200.
68. A Systematic Study of Photonuclear Cross Sections in the $1f_{7/2}$ Shell.
M. N. Thompson, R. E. Pywell, J. I. Weise, R. Farmer, J. Norbury, K. Shoda, M. Sugawara, H. Tsubota, T. Saito, H. Miyase, J. Uegaki, H. Ohashi, T. Tamae and T. Urano : *ibid.* p. 231.
69. Photoalpha Reaction of ^{46}Ti , ^{56}Fe , ^{60}Ni , ^{64}Zr and ^{90}Zr .
T. Tamae, M. Sugawara and T. Urano : *ibid.* p. 239.
70. Electron Scattering from ^{50}Ti .

- A. Hotta, K. Hayakawa, Y. Okazaki, K. Takayama, M. Kawamura and M. Oyamada : *ibid.* p. 244.
71. Electron Scattering Study of Low-Lying Levels in ^{52}Cr .
K. Hayakawa, M. Oyamada, Y. Okazaki and Y. Torizuka : *ibid.* p. 255.
72. Electroexcitation of ^{58}Ni .
T. Saito and K. Itoh : *ibid.* p. 266.
73. Photoproton Decay Mode through Resonances at IAS of Spin-Flip and Non-Spin-Flip Type.
K. Shoda and J. Uegaki : *ibid.* p. 372.
74. $T_>$ Giant Resonance in ^{142}Nd .
T. Saito, K. Shoda, M. Sugawara and H. Miyase : *ibid.* p. 373.
75. Energy Distributions of Pions from $(e, e' \pi^+)$ Reaction on ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{12}C , ^{27}Al and ^{89}Y .
K. Shoda, M. Yamazaki, K. Nakahara and H. Ohashi : *ibid.* p. 800.
76. $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)$ Reaction Relating to Low-Lying States in ^{12}B .
K. Shoda, H. Ohashi and K. Nakahara : *ibid.* p. 801.
77. Angular Distribution of Photopions from $^{16}\text{O}(e, e' \pi^+)^{16}\text{N}$.
B. N. Sung, K. Shoda, M. Yamazaki, K. Nakahara and H. Ohashi : *ibid.* p. 802.
78. Electroexcitation of Giant Monopole and Quadrupole Resonances in ^{181}Ta .
H. Miura and Y. Torizuka : *Phys. Rev. C* **16** (1977) 1688.
79. Electroexcitation of Giant Multipole Resonances.
Y. Torizuka : *Int. School on Electro-and Photonuclear Reactions, Erice, Italy 1976*, eds. S. Costa and C. Schaerf, *Lecture Notes in Physics* **62** (Springer-Verlag, 1977), p.258.
80. $^{12}\text{C}(e, e' \pi^+)$ Reaction Leading to Low-Lying States in ^{12}B .
K. Shoda, H. Ohashi and K. Nakahara : *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 1131 ;
Errata, *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978) 1055.
81. Study of the $f_{7/2}$ Ground Isobaric Analog Resonance in the $(e, e' p)$ Reaction on ^{139}La and ^{141}Pr .
J. Uegaki and K. Shoda : *Nucl. Phys.* **A 294** (1978) 141.

82. New Giant Resonances.

Y. Torizuka : *Proc. Int. Conf. Nuclear Structure, Tokyo, 1977*, J. Phys. Soc. Jpn. **44** (1978) Suppl. p. 397.

83. Photoproduction of π^+ from Nuclei Relating to Residual States.

K. Shoda, K. Nakahara, H. Ohashi, M. Yamazaki and B. N. Sung : *ibid* p. 482.

84. Photoneutron Cross Section of ^{54}Fe .

J. W. Norbury, M. N. Thompson, K. Shoda and H. Tsubota : *Aust. J. Phys.* **31** (1978) 471.

85. Photonuclear Reactions.

M. N. Thompson : *Proc. Int. Conf. Nuclear Interactions, Canberra, 1978*, ed. B. A. Robson, *Lecture Notes in Physics* **92** (Springer-Verlag, 1978), p. 208.

86. Charged Particle Emission in Photoreaction on ^9Be .

K. Shoda and T. Tanaka : *ibid* p.448.

87. Photoprotons from ^{27}Al and ^{24}Mg .

P. Ryan, M. N. Thompson, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and T. Urano : *ibid.* p. 450.

88. Systematics of photonuclear Cross Section in the $1f_{7/2}$ Shell.

M. N. Thompson, R. E. Pywell, J. Weise, J. Norbury, R. Farmer, R. Sutton, R. Hicks, K. Shoda, H. Tsubota, M. Sugawara and T. Saito : *ibid.* p. 452.

89. Photodeuteron Reaction on Odd-Z Light Nuclei.

H. Taneichi, H. Ueno and K. Shoda : *ibid.* p. 456.

90. Photoalpha Reaction in ^{90}Zr

T. Tamae, T. Urano, M. Hirooka and M. Sugawara : *ibid* p. 460

91. Isospin Effects in the Giant Dipole Resonance Region of ^{51}V and ^{59}Co .

T. Tsubota, S. Oikawa, J. Uegaki and T. Tamae : *Nucl. Phys.* **A 303** (1978) 333.

92. Systematic Study of Angular Distribution of Photopion on Light Nuclei.

K. Shoda, K. Nakahara, H. Ohashi and M. Yamazaki : *8th Int. Conf. on High Energy Physics & Nuclear Structure, Vancouver 1979, Abstract*, p. 114.

93. Angular Distribution Study of $T=1$, 4.5MeV Analog Complex in ^{12}B by ^{12}C (e, e')

π^+).

K. Shoda, H. Tsubota, H. Ohashi, M. Yamazaki, K. Min and E. J. Winhold :
ibid. p. 115.

94. Isospin Effect in Photoproton Reaction on Heavy Nuclei.

K. Shoda : *Phys. Rep.* **53** (1979) 343.

95. Charged Pion Spectroscopy.

K. Shoda : *Proc. Int. Conf. Photopion Nuclear Physics*, ed. P. Stoler (Plenum, New York, 1979) p. 175.

96. Study on the Low-Lying States via the Photopion Production on Several Nuclei.

H. Ohashi, K. Nakahara, M. Yamazaki, K. Shoda and B. N. Sung : *ibid.* p. 193.

97. Photopion Energy Distributions and Spin-Isospin Giant Resonances.

K. Shoda, M. Yamazaki, K. Nakahara and H. Ohashi : *ibid.* p. 205.

98. Photoprotons from ^{27}Al and ^{24}Mg .

P. Ryan, M. N. Thompson, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and T. Urano :
*Int. Conf. Nuclear Physics with Electromagnetic Interactions, Abstracts of
Contributed Papers, Mainz 1979* p. 429.

99. Angular Distribution of π^- Photoproduced from Light Nuclei $^6\text{Li}(\gamma, \pi^-)^6\text{He}$.

K. Shoda, H. Ohashi, K. Nakahara and M. Yamazaki : *ibid.* p. 611.

100. The (γ, p_0) Reactions in the Giant Dipole Resonance Region of ^{51}V and ^{52}Cr Nuclei.

H. Tsubota, S. Oikawa, J. Uegaki and T. Tamae : *Nucl. Phys. A* **231** (1979)
157.

101. Magnetic Multipole Transitions in ^{24}Mg by Inelastic Electron Scattering at 180° .

T. Saito, K. Saito and Y. Torizuka : *RCNP Int. Symp. Highly Excited States in
Nuclear Reactions, Osaka, 1980*, eds. H. Ikegami and M. Muraoka (RCNP,
Osaka, 1980) p. 257.

102. A Study of Photoreactions in ^{48}Ti .

R. Sutton, M. N. Thompson, M. Sugawara, K. Shoda, T. Saito and H. Tsubota
: *Nucl. Phys. A* **339** (1980) 125.

103. (e, π^+) Reactions on Nuclei Leading to Discrete Residual States.

K. Shoda : *Lecture Notes 1980 INS KIKUCHI Summer School*, ed. F. Sakata

- (INS, Univ of Tokyo, 1980) p. 343.
104. Charged Particle Photoemission from ^{42}Ca .
R. E. Pywell, M. N. Thompson, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Tsubota, H. Miyase, J. Uegaki, T. Tamae, H. Ohashi and T. Urano : *Aust. J. Phys.* **33** (1980) 685.
105. The $T_{>}$ GDR and the Characteristic Decay Mode by (e, p) Reaction on ^{139}La and ^{141}Pr .
J. Uegaki and K. Shoda : *Nucl. Phys.* **A 341** (1980) 125.
106. Study of Strong Spin-Isospin Mode Analog States at 4.5 MeV in ^{12}B in ^{12}C ($e, e' \pi^+$) ^{12}B .
K. Min, E. J. Winhold, K. Shoda, H. Tsubota, H. Ohashi and M. Yamazaki : *Phys. Rev. Lett.* **4** (1980) 1384.
107. The ^{14}N (e, d_0) Reaction in the Giant Multipole Resonance Region.
H. Taneichi, H. Ueno, K. Shoda, Y. Kawazoe and T. Tsukamoto : *Nucl. Phys.* **A 350** (1980) 157.
108. Electroproduction of π^+ from ^{12}C Leading to Low-Lying Residual States in ^{12}B .
K. Shoda, H. Ohashi and K. Nakahara : *Nucl. Phys.* **A 350** (1980) 377.
109. Statistical and Pre-equilibrium (γ, α) Cross Sections of ^{90}Zr and Their Multipolarities via the ^{90}Zr (e, α) Reaction.
T. Tamae, T. Urano, M. Hirooka and M. Sugawara : *Phys. Rev. C* **21** (1980) 1758.
110. A Study of the Decay Modes of the $g_{9/2}$ and $i_{11/2}$ Isobaric Analog Resonances in ^{209}Bi Using Electrons and Bremsstrahlung.
J. Uegaki, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito and H. Tsubota : *Nucl. Phys.* **A 371** (1981) 93.
111. Momentum Transfer Dependence of ^6Li (γ, π^+) ^6He Cross Sections.
K. Shoda, O. Sasaki and T. Kohmura : *Phys. Lett.* **101B** (1981) 124.
112. Strong Spin-Flip Transitions Observed in ^{13}C (e, π^+) ^{13}B .
K. Min, E. J. Winhold, K. Shoda, H. Tsubota, M. Yamazaki and M. Torikoshi : *9th Int. Conf. High Energy Physics and Nuclear Structure, Versailles 1981, Abstract*, p. 79.

113. Study of ^{13}C (e, π^+) ^{13}B (g. s.) .
K. Shoda, H. Tsubota, M. Yamazaki, M. Torikoshi, A. M. Bernstein, E. J. Winhold and K. Min : *ibid* p. 80.
114. Angular Distributions of Photo - π^+ from Light Nuclei Leaving Low-Lying Residual States.
M. Yamazaki, K. Shoda, H. Tsubota, M. Torikoshi and O. Sasaki : *ibid* p. 115.
115. Momentum Transfer Dependence of ^6Li (γ, π^+) ^6He Cross Sections.
K. Shoda, O. Sasaki and T. Kohemura : *ibid.* p. 106.
116. The Photoproton Decay of ^{27}Al .
P. J. P. Ryan, M. N. Thompson, K. Shoda and T. Tanaka : Nucl. Phys. **A 371** (1981) 318.
117. Photonuclear and Photopion Physics in Japan.
K. Shoda : *Proc. Int. School of Intermediate Energy Physics*, eds. R. Bergere, S. Costa and C. Schaerf (World Scientific, 1982) p. 307.
118. Electorexcitation of Giant Multipole Resonances in ^{24}Mg .
K. Itoh, S. Ohsawa, Y. Torizuka, T. Saito and T. Terasawa : Phys. Rev. C **23** (1981) 23.
119. Magnetization Distribution of ^{51}V Studied by Elastic Electron Scattering through 180° .
K. Arita, A. Enomoto, S. Oguro, Y. Mizuno, T. Nakazato, S. Ohsawa, T. Saito, T. Terasawa and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **23** (1981) 1482.
120. Electroexcitation of Giant Electric-Dipole and Electric-Quadrupole Resonances in ^{42}Ca and ^{44}Ca .
K. Itoh, Y. M. Shin, T. Saito and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **24** (1981) 1969.
121. π^+ Photoproduction from ^{13}C .
J. LeRose, K. Min, D. Rowley, B. O. Sapp, P. Stoler, P. -K. Teng, E. J. Winhold, P. F. Yergin, A. M. Bernstein, K. I. Blomqvist, H. S. Caplan, S. A. Dytman, G. Franklin, M. Pauli, K. Shoda and M. Yamazaki : Phys. Rev. C **26** (1982) 2554.
122. The Angular Distribution of Photoprotons from ^{27}Al .

- P. J. P. Ryan, M. N. Thompson, K. Shoda and M. Hirooka : Nucl. Phys. **A 389** (1982) 29.
123. Electroexcitation of Giant Multiple Resonances in ^{148}Sm and ^{152}Sm .
B. S. Dolbilkin, S. Ohsawa, Y. Torizuka, T. Saito, Y. Mizuno and K. Saito :
Phys. Rev. C **25** (1982) 2255.
124. Isoscalar High-Energy Octupole Resonances in ^{92}Zr in Inelastic Electron Scattering.
T. Saito, Y. Fujii, K. Saito, Y. Torizuka, T. Tohei and J. Hirota : Phys. Rev.
C **28** (1983) 652.
125. Pion Angular Distribution in $^{13}\text{C} (\gamma, \pi^+)^{13}\text{B}$.
K. Shoda, M. Yamazaki, M. Torikoshi, H. Tsubota, K. Min, E. J. Winhold and
A. M. Bernstein : Phys. Rev. C **27** (1983) 443.
126. Photopion Angular Distribution from $^9\text{Be} (e, \pi^+)^9\text{Li}$ (g. s.).
K. Shoda, M. Yamazaki, M. Torikoshi, O. Sasaki, H. Tsubota and B. N. Sung
: Nucl. Phys. **A 403** (1983) 469.
127. Isovector M2 and M4 Excitations via $^{12,13}\text{C} (\gamma, \pi^+)$.
K. Shoda, M. Torikoshi, M. Yamazaki, O. Sasaki, H. Tsubota, E. J. Winhold,
K. Min and B. N. Sung : *Int. Conf. on Nuclear Physics, Florence 1983*.
128. Study of Isovector Spin-Isospin Mode Analog Giant Resonances in the Photopion
Reactions $^{12,13}\text{C} (\gamma, \pi^+)^{12,13}\text{B}$.
K. Shoda, M. Torikoshi, M. Yamazaki, O. Sasaki, H. Tsubota, K. Min, E. J.
Winhold and B. N. Sung : *Int. Conf. Highly Excited States and Nuclear
Structure, Orsay 1983*.
129. Isovector Spin-Isospin Mode Analog Giant Resonances in ^{13}B by $^{13}\text{C} (e, \pi^+)^{13}\text{B}$.
K. Min, E. J. Winhold, K. Shoda, M. Torikoshi, M. Yamazaki, O. Sasaki, H.
Tsubota and B. N. Sung : Phys. Rev. C **28** (1983) 464.
130. Photo π^+ Production from ^{16}O .
K. Shoda, M. Yamazaki, M. Torikoshi, O. Sasaki, H. Tsubota, and B. N. Sung
: J. Phys. Soc. Jpn. **52** (1983) 3355.
131. The Photodisintegration of ^{24}Mg .
P. J. Ryan, M. N. Thompson, K. Shoda and T. Tanaka : Nucl. Phys. **A 411**

(1983) 105.

132. The Current Tohoku Program-A Photon Tagging System for Intermediate Energy Photonuclear Experiment.

T. Terasawa, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda and Y. Torizuka, K. Maeda, P. Harty and M. N. Thompson : *Proc. Medium-Energy Photoproton Workshop, Melbourne, 1983*, ed. M. N. Thompson p. 163.

133. Photo-Pion Studies at Tohoku.

K. Shoda : *ibid.* p. 175.

134. Measurements of Photoprotons from ^{27}Al and ^{12}C Nuclei at Intermediate Energies.

T. Terasawa, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda, Y. Torizuka, K. Maeda, P. Harty and M. N. Thompson : *Proc. 1983 INS Int. Symp. High Energy Photo-Nuclear Reactions and Related Topics*, eds. S. Homma and F. Sakata (INS, Univ. of Tokyo, 1983) p. 311.

135. The Strong Spin-Flip Transitions in the $^{12,13}\text{C}$ (e, π^+) Reactions.

M. Torikoshi, O. Sasaki, S. Tohyama, T. Kobayashi, K. Shoda, H. Tsubota, K. Min, E. J. Winhold, M. Yamazuki and B. N. Sung : *ibid.* p. 320.

136. Charged Photo-Meson Production from Nuclei.

K. Shoda : *Proc. 3rd French-Japanese Symp. on Nuclear Physics*, eds. M. Sakai and Y. Kawazoe (Maison Franco-Japonaise, 1983) p. 65.

137. Identification of E2 Strength Distribution in ^{65}Cu by the (e, p_0) Reaction.

H. Miyase, H. Tsubota, Y. Kawazoe and T. Tsukamoto : *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 821.

138. The $^{63,65}\text{Cu}$ (e, p_0) Reactions in the Giant Resonance Energy Region.

Y. Kawazoe, T. Tsukamoto, H. Miyase and H. Tsubota : *Proc. Int. Symp. Electromagnetic Propertise of Atomic Nuclei, 1983, Tokyo*, eds. H. Horie and H. Ohnuma (Tokyo Institute of Technology, 1983) p. 565.

139. ^{24}Mg (e, α) Reaction in the Giant Resonance Region.

M. Hirooka, T. Tanaka, A. Tanaka, T. Tamae, M. Sugawara and H. Miyase : *Nucl. Phys.* **A431** (1984) 269.

140. (γ, p) Reaction of ^{54}Fe .

- H. Tsubota, H. Miyase and T. Tamae : Phys. Rev. C **30** (1984) 1168.
141. (γ , π^+) Spectroscopy on Light Nuclei in the Threshold Region.
K. Shoda : *Proc. Int. Symp. Nuclear Spectroscopy and Nuclear Interaction, Osaka, 1984*, eds. H. Ejiri and T. Fukuda (World Scientific, 1984) p. 485.
142. Photoproton and Photoneutron Studies in the Intermediate Energy Region Using Tagged Photons.
T. Terasawa, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda, O. Konno, Y. Torizuka, K. Maeda, P. Harty and M. N. Thompson : *ibid.* p. 535.
143. Photoproduction of Mesons on Nuclei.
K. Shoda : *Proc. Int. Symp. Electromagnetic Interactions of Nuclei at Low and Medium Energies, Moscow 1984*.
144. π^+ Photoproduction from ^{28}Si Leaving Low-Lying Residual States.
K. Shoda, M. Torikoshi, M. Yamazaki, O. Sasaki and H. Tsubota : Nucl. Phys. **A439** (1985) 669.
145. Photoexcitation Mechanisms and the Fission Process of ^{209}Bi from Threshold to the Δ Region.
J. A. Arruda-Neto, M. Sugawara, T. Tamae, O. Sasaki, H. Ogino, H. Miyase and K. Abe : Phys. Rev. C **31** (1985) 2321.
146. Angular Distribution of π^- Produced from ^{13}C (γ , π^-) $^{13}\text{N}_{g.s.}$ by 163 MeV Electron.
K. Shoda, A. Kagaya, O. Sasaki, S. Toyama, T. Kobayashi and H. Tsubota : *Abstracts of the Invited Talks and Contributed Papers on Nuclear Physics with Electromagnetic Probes, Paris, 1985*, p. 202.
147. Systematics of π^+ Spectra by (e , π^+) Reaction on ^7Li , ^{28}Si , ^{51}V and ^{93}Nb at $E_e=200$ MeV.
K. Shoda, S. Toyama, M. Torikoshi, O. Sasaki and T. Kobayashi : *ibid.* p. 212.
148. Isovector Spin Flip Electric Dipole Resonances Studied by (e , π^+) Reactions on ^{12}C and ^6Li .
K. Shoda, M. Torikoshi, O. Sasaki, H. Tsubota, S. Toyama, T. Kobayashi and A. Kagaya : *ibid.* p. 214.
149. ^{58}Ni (e , $e'p$) Measurement in the Giant Dipole Resonance Region.

- H. Kawahara, T. Hino, A. Tanaka, T. Tamae and M. Sugawara : *ibid.* p. 238.
150. Measurement of Photoproton from ^{27}Al and ^{12}C Nuclei at Intermediate Energies.
T. Terasawa, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda, Y. Torizuka, K. Maeda, P. Harty, and M. N. Thompson : *ibid.* p. 320.
151. Strong Spin-Flip Transitions in the $^{12,13}\text{C}$ (e, π^+) Reactions.
M. Torikoshi, O. Sasaki, S. Tohyama, T. Kobayashi, K. Shoda, H. Tsubota, K. Min, E. J. Winhold, M. Yamazaki and B. N. Sung : *ibid.* p. 320.
152. Photoexcitation Mechanisms and the Fission Process of ^{209}Bi from Threshold to the Δ Region.
J. A. Arruda-Neto, M. Sugawara, T. Tamae, O. Sasaki, H. Ogino, H. Miyase and K. Abe : *Phys. Rev. C* **31**(1985) 2321.
153. Electroexcitation of Giant Multipole Resonances in ^{63}Cu .
Y. Kawazoe, H. Miyase, H. Tsubota, J. Yokokawa, M. Oyamada and Y. Torizuka : *Phys. Rev. C* **33** (1986) 1917.
154. Contribution of M1 and E0 Transitions in ^{13}C (γ, π^-) $^{13}\text{N}_{g.s.}$ in the Threshold Region.
K. Shoda, A. Kagaya, O. Sasaki, S. Toyama, K. Kobayashi and H. Tsubota : *Phys. Lett.* **169B** (1986) 17.
155. $^{6,7}\text{Li}$ (γ, π^+) $^{6,7}\text{He}$ Reactions for Highly Excited Resonances in $^{6,7}\text{He}$.
K. Shoda, O. Sasaki, S. Toyama, H. Tsubota, T. Kobayashi and A. Kagaya : *Proc. Int Symp. Weak and Electromagnetic Interaction in Nuclei, Heidelberg, 1986*, ed. H. V. Klapdor (Springer DEU, 1986).
156. Nuclear Spin-Isospin Excitations Studied by Photopion Productions.
K. Shoda and A. Kagaya : *ibid.*
157. Spin-Dipole Isovector Resonances in ^{12}C and ^6Li by Positive Photopion Production.
K. Shoda, M. Torikoshi, O. Sasaki, S. Toyama, T. Kobayashi, A. Kagaya and H. Tsubota : *Phys. Rev. C* **33** (1986) 2179.
158. Photoproduction of Mesons on Nuclei.
K. Shoda : *Proc. 6th Seminar Electromagnetic Interactions of Nuclei at Low and Medium Energies, Moscow, 1984*, (1986) p. 118.

159. Angular Distributions of π^+ in the $^{10}\text{B}(\gamma, \pi^+)$ Reaction Leading to Low-lying States of ^{10}Be .
M. Yamazaki, K. Shoda, M. Torikoshi, O. Sasaki and H. Tsubota : *Phys. Rev. C* **34** (1986) 1123.
160. Experimental Plan on K^+ Photoproduction for a Study of Hypernuclei.
K. Shoda : *Proc. 1986 INS Int. Symp.* (1986) p. 184.
161. Photoexcitation Mechanisms and Fission of ^{209}Bi from Threshold to the Δ Region.
J. A. Arruda-Neto, M. Sugawara, T. Tamae, O. Sasaki, H. Ogino, H. Miyase and K. Abe : *Phys. Rev. C* **34** (1986) 935.
162. Out-of-Plane Measurement in the $(e, e'p)$ Coincidence Experiment.
T. Tamae, H. Kawahara, A. Tanaka, N. Nomura, K. Namai, Y. Kawazoe, H. Tsubota, H. Miyase and M. Sugawara : *Contributed Papers on Few Body XI Tokyo / Sendai* (1986) p. 60.
163. The E2 Strength Distribution in ^6Li Studied by the (e, d_0) Reaction.
H. Taneichi, H. Ueno, K. Shoda, Y. Kawazoe and T. Tsukamoto : *Nucl. Phys. A* **448** (1986) 315.
164. The Photoproduction Reaction of $^{25}\text{Mg}^*$.
R. A. Sutton, M. N. Thompson, M. Hirooka, T. Tanaka and K. Shoda : *Nucl. Phys. A* **452** (1986) 41.
165. The $^{63,65}\text{Cu}(e, p_0)$ Reactions in the Giant Resonance Region.
H. Miyase, H. Tsubota, Y. Kawazoe and T. Tsukamoto : *Nucl. Phys. A* **457** (1986) 109.
166. Out-of-Plane Measurement of the D $(e, e'p)$ Coincidence Cross Section.
T. Tamae, H. Kawahara, A. Tanaka, K. Namai, M. Sugawara, Y. Kawazoe, H. Tsubota and H. Miyase : *Phys. Rev. Lett.* **59** (1987) 2919.
167. Contribution of M1 and E0 Transitions in the $^{15}\text{N}(\gamma, \pi^-)$ $\text{O}_{g.s.}$ in the Threshold Region.
K. Kobayashi, K. Shoda, A. Kagaya, K. Takeshita and H. Tsubota : *Abstract Book 2, XI Int. Conf. on Particles and Nuclei, 1987*, p. 676.
168. M1 Transition in $^{24}\text{Mg}(\gamma, \pi^+)^{24}\text{Na}$ Reaction.

- H. Tsubota, B. N. Sung, A. Kagaya and K. Takeshita : *ibid*, p. 678.
169. The M1 Transition Strength in the $^{14}\text{N}(\gamma, \pi^+)^{14}\text{C}^*$ Reaction.
B. N. Sung, K. Shoda, A. Kagaya, T. Kobayashi, S. Toyama, O. Sasaki, M. Torikoshi and H. Tsubota : *ibid*, p. 686.
170. Measurements of $^{10}\text{B}(\gamma, p)$ and $^{10}\text{B}(\gamma, pn)$ Cross Sections at $E\gamma = 55-103$ MeV.
T. Suda, T. Terasawa, I. Nomura, J. Yokokawa, T. Suzuki, Y. Torizuka, K. Maeda, J. Eden, G. O'Keefe, R. Rassool and M. N. Thompson : *ibid*, p. 690.
171. The Photonuclear Cross Sections of ^{48}Ca .
G. J. O'Keefe, M. N. Thompson, Y. I. Assafiri, R. E. Pywell and K. Shoda :
Nucl. Phys. **A 469** (1987) 239.
172. The Strong M1 Transition to Low-Lying 2^+ States in the $^{14}\text{N}(\gamma, \pi^+)^{14}\text{C}^*$ Reaction.
B. N. Sung, K. Shoda, A. Kagaya, S. Toyama, M. Torikoshi and H. Tsubota :
Nucl. Phys. **A 473** (1987) 705.
173. $^{89}\text{Y}(\gamma, p_0)$ Cross Section Deduced from the $^{89}\text{Y}(e, p_0)$ Reaction.
H. Miyase, H. Tsubota, Y. Kawazoe and T. Tsukamoto : Phys. Rev. **C 36**
(1987) 1792.
174. Charge Number Dependence of π^+ in $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)$ Reaction.
K. Shoda, S. Toyama, M. Torikoshi, O. Sasaki and T. Kobayashi : Nucl. Phys.
A 486 (1988) 512.
175. Branching of π^+ Production from Nuclei by 200 MeV Electron.
K. Shoda, T. Kobayashi, O. Sasaki and S. Toyama : Nucl. Phys. **A 486** (1988)
526.
176. Spin-Isospin Transitions in $^{40}\text{Ca}(\gamma, \pi^+)^{40}\text{K}$ Reaction.
A. Kagaya, K. Shoda, K. Takeshita, T. Shimada, T. Kobayashi, and H. Tsubota : *Abstr. of 17th INS Int.l Sym. on Nuclear Physics at Intermediate Energy (Tokyo, 1988)* p. 30.
177. $^{24}\text{Mg}(\gamma, \pi^+)^{24}\text{Na}$ Reaction near Threshold.
H. Tsubota, K. Shoda, O. Sasaki, S. Toyama, T. Kobayashi, A. Kagaya, K. Takeshita and B. N. Sung : *ibid*. p. 58.
178. Observation of the $\frac{1}{2}^-$ ^9Be State by the (e, π^-) Reaction.

- T. Yamaya, S. Oh-ami, B. N. Sung, K. Shoda, A. Kagaya, K. Takeshita, T. Kobayashi, H. Tsubota and T. Shimada : *ibid.* p. 80.
179. ${}^6\text{Li}$ ($e, e' p$) Coincidence Experiment.
M. Nomura, T. Tamae, T. Tadokoro, H. Matsuyama, M. Sugawara, H. Miyase, H. Tsubota and Y. Kawazoe : *ibid.* p. 82.
180. Angular Distributions for the ${}^{12}\text{C}$ ($e, e' n$) ${}^{11}\text{C}$ Reaction in the Giant Resonance.
T. Saito, S. Suzuki, K. Takahisa, T. Tohei, T. Nakagawa, Y. Kobayashi and K. Abe : *ibid.* p. 84.
181. Out-of-Plane Measurement of the ${}^{65}\text{Cu}$ ($e, e' p_0$) Reaction in the Giant Resonance Region.
Y. Kawazoe, H. Miyase, H. Tsubota, K. Namai, A. Nomura, H. Kawahara, A. Tanaka, T. Tamae and M. Sugawara : *J. Phys. Soc. Jpn.* **57** (1988) 2869.
182. The ${}^{40}\text{Ca}$ ($e, e' p_0$) ${}^{39}\text{K}$ Coincidence Cross Section in the Giant Dipole Resonance Region.
A. Tanaka, T. Hino, H. Kawahara, M. Nomura, T. Tamae, M. Sugawara, H. Tsubota, H. Miyase and Y. Kawazoe : *Nucl. Phys. A* **489** (1988) 381.
183. Measurements of ${}^{10}\text{B}$ (γ, p) and ${}^{10}\text{B}$ (γ, pn) Cross Sections at $E\gamma = 66 - 103$ MeV.
T. Suda, T. Terasawa, I. Nomura, J. Yokokawa, T. Suzuki, Y. Torizuka, K. Maeda, O. Konno, J. Eden, G. O' Keefe, R. Rassool, M. N. Thompson and J. Kim : *J. Phys. Soc. Jpn.* **57** (1988) 5.
184. ${}^{12}\text{C}$ (γ, n) Cross Section from 30 to 100 MeV.
P. Harty, M. N. Thompson, G. O' Keefe, R. Rassool, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda, I. Nomura, O. Konno, T. Terasawa and Y. Torizuka : *Phys. Rev. C* **37** (1988) 13.
185. The Analyzing Power of the ${}^{12}\text{C}$ (γ, p) Reaction Measured Using Tagged Polarized Photons.
J. Yokokawa, O. Konno, I. Nomura, T. Suda, T. Suzuki, T. Terasawa, Y. Torizuka, K. Maeda, J. Eden, D. McLean and M. N. Thompson : *J. Phys. Soc. Jpn.* **57** (1988) 695.
186. Measurement of ${}^{6,7}\text{Li}$ (γ, p) Cross Sections in the 30-100 MeV Photon.

- I. Nomura, O. Konno, K. Maeda, D. McLean, T. Suda and Y. Sugawara :
Abstracts of the 17th INS Int. Symp. Nuclear Physics at Intermediate Energy,
Tokyo, (1988) p.1245.
187. Electron-induced Fission Decay from $(J, K) = (2^+, 0)$ States in ^{208}Pb .
J. D. T. Arruda-Neto, M. Sugawara, H. Miyase, T. Kobayahi, T. Tamae, K.
Abe, M. Nomura, H. Matsuyama, H. Kawahara, K. Namai, M. L. Yoneama
and S. Simionatto : *J. Phys. G : Part. Phys.* **15** (1989) L215.
188. A Review of Photonuclear Cross Sections Measured under the Tohoku-Melbourne
Collaboration.
M. N. Thompson : *Proc. Workshop on Photonuclear Reactions using*
Continuous Electron Beam, Sendai, 1989, ed. T. Terasawa, Research Report of
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University **22** (1989) Suppl. p. 1.
189. Results of Tagged Photon Experiments at KAKURIKEN.
K. Maeda : *ibid.* p. 18.
190. $(e, e' p)$ Experiments Using the SSTR.
T. Tamae : *ibid.* p. 53.
191. $^{12}\text{C} (e, e' n)$ Experiment.
K. Takahisa, T. Saito, S. Suzuki, T. Tohei, T. Nakagawa, Y. Kobayashi and K.
Abe : *ibid.* p. 59.
192. Status of the $^4\text{He} (\gamma, n) ^3\text{He}$, $^4\text{He} (\gamma, np)$ Experiment.
A. D. Bates, O. Konno, K. Maeda, D. McLean, I. Nomura, R. P. Rassool, T.
Suda, Y. Sugawara, T. Terasawa and M. N. Thompson : *ibid.* p. 63
193. $^6\text{Li} (\gamma, p)$ Experiment.
I. Nomura : *ibid.* p. 68.
194. Photonuclear Reactions in Light Nuclei at Intermediate Energies.
M. N. Thomsom : *Proc. 7th Seminar on Electromagnetic Interactions in Nuclei*
at Low and Intermediate Energies, USSR Acad. of Science (1989).
195. Recent Recults with Sendai Tagger.
T. Terasawa : *Proc. Workshop on Nuclear Physics with Real Photons below*
Pion Threshold, Gent, ed. D. Ryckbosh, (Rijksuniversiteit, Gent, 1989) p. 43.

196. Photoneutron Cross Sections Measured by the Tohoku-Melbourne Group.
M. N. Thompson : *ibid.* p. 51.
197. Electrofission of ^{208}Pb in the Intermediate Energy Region.
J. D. T. Aruuda-Neto, M. Sugawara, H. Miyase, T. Tamae, K. Abe M.
Nomura, H. Matsuyama, K. Namai, M. L. Yoneama and S. Simionatto :
Phys. Rev. C **41** (1990) 354.
198. ^{40}Ca Photoneutron Cross Section above the Giant Dipole Resonance.
J. A. Eden, G. J. O'Keefe, R. P. Rassool, D. J. McLean and M. N. Thompson
: Phys. Rev. C **44** (1991) 753.
199. Comment on the Need to introduce a T=1 Quasi-deuteron.
D. A. Sims, S. Karataglidis, G. O'Keefe, R. P. Rassool, A. D. Bates, M. N.
Thompson, S. Ito, H. Matuyama, S. Sasaki, O. Konno, T. Terasawa, T. Suda
and K. Maeda : Phys. Rev. C **45**(1992) 479
200. The (γ, p) and (γ, α) Cross Sections for $^{62, 63}\text{Cu}$ in the Giant Dipole Resonance
Region.
T. Tanaka, M. Hirooka, M. Sugawara, T. Tamae and H. Tsubota : Nucl. Phys.
A 559 (1993) 317.
201. Observation of Pion-Related Effects in the Photofission of Preactinide Nuclei.
J. D. T. Aruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe. K.
Takahisa, O. Konno and M. Oikawa : Phys Rev C **48** (1993) 1594.
202. Observation of Fine Thermalization Effects in the Electrofission of Preactinide
Nuclei.
J. D. T. Arruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe,
K. Takahisa, O. Konno, M. Oikawa and S. Simionatto : J. Phys. G : Nucl.
Part. Phys. **20** (1994) 197.
203. The $(e, e' p_0)$ Coincidence Cross Section for ^{12}C at Transfer Energy of 40 MeV.
T. Tadokoro, T. Hotta, T. Miura, M. Sugawara, A. Takahashi, T. Tamae, E.
Tanaka, H. Miyase and H. Tsubota : Nucl. Phys. **A 575** (1994) 333.
204. Thermalization Related Effects in the Electrofission of Preactinide Nuclei.
J. D. T. Arruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe,

- K. Takahisa, O. Konno, M. Oikawa, A. Deppman and S. Simionatto. Phys. Rev. C **50** (1994) 282.
205. Excitation of Giant Resonances in the ^{40}Ca ($e, e' n$) ^{39}Ca Reaction.
C. Takakuwa, T. Saito, S. Suzuki, K. Takahisa, T. Tohei, T. Nakagawa and K. Abe : Phys. Rev. C **50** (1994) 845.
206. Future Prospects in Electronuclear Physics. T. Tamae : *Proc. 14 th RCNP OSAKA Int. Sym. -Nuclear Reaction Dynamics of Nucleon-Hadron Many Body System*, (1995) p. 449.
207. Dipole Strengths in ^{11}Be from Electroproduction of Charged Pions.
T. Yamaya, M. Saitoh, H. Yamazaki, T. Taniuchi, K. Shoda and H. Tsubota : Phys. Rev. C **51**(1995) 493.
208. Photofission of ^{182}W Following Reabsorption of Photopions.
J. D. T. Arruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe, O. Konno, M. Oikawa, A. Deppman, S. Simonatto, E. M. L. Macedo and B. S. Bhandar : Phys. Rev. C **51** (1995) R452.
209. ^{12}C (γ, p_{0+1}) ^{11}B Cross Section from 44 to 98 MeV.
K. Mori, P. D. Harty, Y. Fujii, O. Konno, K. Maeda, I. Nomura, G. J. O'Keefe, J. Ryckebusch, T. Suda, T. Terasawa, M. N. Thompson and Y. Torizuka : Phys. Rev. C **51** (1995) 2611.
210. Photoexcitation Mechanisms Investigated through the Fission Channel.
J. D. Arruda-Neto, T. Saito, M. Sugawara, T. Tamae, H. Miyase, K. Abe, O. Konno, M. Oikawa, S. Simionatto, M. L. Yoneama, J. F. Dias, A. Deppman, B. S. bhandari, V. P. Likhachev and A. C. S. Lima : Phys. Rev. C **54** (1996) 3294.
211. Angular Correlations for the ^{12}C ($e, e' n$) ^{11}C Reaction in the Giant Resonance Region.
T. Saito, S. Sugaki, K. Takahisa, C. Takakuwa, M. Oikawa, T. Tohei, T. Nakagawa and K. Abe : Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1018.
212. Measurement of the D(d,p)T Reaction in Ti for $2.5 < E_d < 6.5\text{keV}$ and Electron Screening in Metal.
H. Yuki, T. Sato, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki, J. Kasagi and

- K. Ishii : J. Phys. Soc. Jpn. **66** (1997) 73.
213. Response of Pure CsI to Charged Pions in the Intermediate Energy Region.
H. Yamazaki, T. Yorita, H. Yuki, J. Kasagi, S. Kato, H. Shimizu, H. Y. Yoshida, K. Murakami, H. Okuno and T. Sawamoto : Nucl. Instr. Meth. A(1977) in press.
214. Bremsstrahlung in α -Decay of ^{210}Po : Do α Particles Emit Photons in Tunneling ?
J. Kasagi, H. Yamazaki, N. Kasajima, T. Ohtsuki and H. Yuki : Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 371.
215. The D+D Reactions in Metal at Bombarding Energies below 5 KeV.
H. Yuki, T. Sato, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki and J. Kasagi : J. Phys. G (1997) in press.
216. Bremsstrahlung Emission in α -Decay and Tunneling Motion of α Particles.
J. Kasagi, H. Yamazaki, N. Kasajima, T. Ohtsuki and H. Yuki : J. Phys. G (1997) in press
217. Physics with Tohoku Electron Machine.
J. Kasagi : *Proc. XV RCNP Osaka Int. Symp. on Nuclear Physics Frontiers with Electroweak probes*, eds. H. Toki, T. Kishimoto and M. Fujiwara (World Scientific Pub., 1997) p. 130.
218. Reaction Rates of the D+D Reaction in Metal at very Low Energies.
H. Yuki, T. Satoh, T. Ohtsuki, T. Yorita, Y. Aoki, H. Yamazaki and J. Kasagi : *Proc. 6th Int. Conf. on Cold Fusion*, ed. M. Okamoto (NEDO and IAE, 1997) p. 259.

II 物性関係

1. The ^{76}Ge 13.3 KeV Mössbauer Effect and its Applications to Lattice Defect Study in Semiconductors.
K. Matsui, O. Konno and S. Ishino : Defects in Semiconductors, p. 447 (1972).
2. Inner-Shell Ionization by Relativistic Electrons.
S. Morita, K. Ishii, M. Kamiya, K. Sera, H. Tawara, M. Oyamada, H. Kaji and T. C. Chu : *Proc. Second Int. Conf. on Inner-Shell Ionization Phenomena, Freiburg, 1976.*
3. Inner-Shell Ionization by Ultrarelativistic Electrons.
K. Ishii, M. Kamiya, K. Sera, S. Morita, H. Tawara, M. Oyamada and T. C. Chu : *Phys. Rev.* **A15** (1977) 906.
4. Density Effect in K-Shell Ionizations by Ultrarelativistic Electrons.
M. Kamiya, K. Ishii, H. Endo, Y. Kinefuchi, M. Oyamada and S. Morita : *JJAP.* **17** (1978) Suppl. 17-2, p. 337.
5. Density Effect in Ionization by Ultrarelativistic Electrons.
M. Kamiya, A. Kuwako, K. Ishii, S. Morita and M. Oyamada : *Phys. Rev.* **A22** (1980) 413.
6. Hyperfine Field of ^{156}Cd in Tb ($\text{Zn}_{1-x}\text{Cu}_x$) with $X=0, 0.36, 0.46$.
T. Shinohara, A. Furusawa, S. Hayashibe, S. Yamaguchi and T. Kamiyama : *Hyperfine Interactions* **12** (1982) 297.
7. アモルファス固体材料.
鈴木謙爾 : *ぶんせき* **10** (1983) 753.
8. 原子・分子の強制運動を追跡する.
新村信雄 : *プロメテウス* **7** (1983) 36.
9. Deep Defect Levels in Plastically Deformed GaAs.
M. Suezawa and K. Sumino : *Jpn. J. Appl. Phys.* **25** (1986) 533.
10. Defects with Deep Levels in GaAs Induced by Plastic Deformation and Electron Irradiation.
T. Haga, M. Suezawa and K. Sumino : *Jpn. J. Appl. Phys.* **27** (1988) 1929.
11. Investigation of Midgap Defects GaAs Induced by Heat-treatment (ELS), Electron-

irradiation, and Plastic Deformation.

T. Haga, M. Suezawa and K. Sumino : *Defects in Electronic Materials* **104** (1988) 387.

12. Defects with Deep Levels Induced by Plastic Deformation and Electron Irradiation in EL2-free GaAs.

T. Wakamiya, M. Suezawa and K. Sumino : *Radiation Effects and Defects in Solids* **111–112** (1989) 425.

13. Impurity-diffusion of Copper in Aluminum.

S. I. Fujikawa and K. I. Hirano : *Defect and Diffusion Forum* **66–69** (1989) 447.

14. Optical Properties of Plastically Deformed and Electron Irradiated Indium Phosphide.

Y. Horii, M. Suezawa and K. Sumino : *Defect Control in Semiconductors* ed. K. Sumino (North-Holland, 1990) p. 1283.

15. Clustering of Silicon Atoms in Gallium Arsenide.

M. Suezawa, A. Kasuya, Y. Nishina and K. Sumino : *Conf. Phys. of Semicon*, eds. E. M. Anastassakis and A. Joannopoulos (World Scientific, 1990) p. 678.

16. Neutron and X-ray Diffraction Study on the Location of the Hydrogen Isotopes in $\text{TiO}_{0.3}$ and $\text{ZrO}_{0.4}$.

T. Kajitani, S. Mukawa and M. Hirabayashi : *Mat. Trans. JIM* **32** (1991) 807.

Ⅲ 中性子回折

1. Neutron Debye-Scherrer Diffraction Works Using a Linear Electron Accelerator.
M. Kimura, M. Sugawara, M. Oyamada, Y. Yamada, S. Tomiyoshi,
T. Suzuki, N. Watanabe and S. Takeda : Nucl. Instrum. and Method **71** (1969)
102.
2. Measurements of Time-Dependent Spectra in Small BeO Assemblies.
N. Watanabe, M. Kimura, M. Oyamada, Y. Yamada, S. Takada,
F. Takahashi and S. Tomiyoshi : J. Nucl. Energy **25** (1971) 203.
3. Time-Dependent Spectra of Thermal Neutrons in Small BeO Assemblies.
N. Watanabe : J. Nucl. Energy **25** (1971) 213.
4. Neutron Down Scattering Spectrum of Isotactic Polypropylene.
T. Yasukawa, M. Kimura, N. Watanabe and Y. Yamada : J. Chem. Phys. **55**
(1971) 983.
5. Some Aspects on the Utilization of the Proposed Pulsed Neutron Facility in Japan
Pulsed Neutrons and Their Utilization.
M. Kimura, Y. Ishikawa and N. Watanabe : *EUR495e, Commission of the
European Communities* (1972) p. 11.
6. Some Technical Aspects Concerning the Linac-Booster, Neutron Source Proposed in
Japan.
T. Egusa, T. Fuketa, Y. Hamaguchi, M. Hirata, T. Izumi, M. Kimura,
N. Moriyama, Y. Ohno, I. Ohtake, M. Oyamada, S. Suda, T. Suita,
K. Sumita, J. Wakabayashi and N. Watanabe : *ibid.* p.75.
7. Conceptual Design Study of the Rotating Reflector for the Proposed Linac-Booster
Facility in Japan.
M. Kimura, T. Egusa, N. Watanabe, M. Hirata, Y. Ohno, K. Nagashima,
T. Izumi, J. Takahahi, K. Sumita and K. Iyoku : *ibid.* p. 127.
8. A Preliminary Note on the Beam Transport System in the Linac-Booster Facility
Pulsed Neutrons and Their Utilization.
Y. Oyamada, N. Watanabe and M. Kimura : *ibid.* p. 217.

9. Some Experience using the Tohoku Electron Linac as a Pulsed Neutron Source for the Study of Condensed Matter.
M. Kimura, T. Kubota, N. Niimura, M. Oyamada, A. Ozora, K. Sato, F. Takahashi, S. Takeda, S. Tomiyoshi, Y. Yamada and N. Watanabe : *ibid.* p. 75.
10. A Feasibility Study of Applying Neutron T-O-F Method for the Liquid Structure Analysis.
T. Tomiyoshi, N. Watanabe, M. Misawa, K. Kai, N. Niimura, M. Oyamada and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 (1972)* ; Jpn. J. Appl. Phys. **12** No. 8 (1973).
11. The Neutron Time-of-Flight Spectrometry for Single Crystal.
N. Niimura, S. Tomiyoshi, N. Watanabe and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)* ; Acta Cryst. **A28** (1972) S. 197.
12. Neutron Scattering of Molecular Motions in Solid Anthraquinone and 1,2-Dichloroethane.
A. Ozora, Y. Miyazaki, M. Itoh, N. Watanabe and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)*.
13. Neutron Spectroscopy with Linac-Booster.
Y. Ishikawa, M. Kimura and N. Watanabe : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)*.
14. Moderator Optimization Studies for Accelerator Pulsed Booster.
N. Watanabe, M. Kimura, F. Takahashi and S. Tomiyoshi : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)*.
15. Magnetic Structure of $\text{Sr}_2 \text{Fe}_2 \text{O}_5$.
S. Tomiyoshi, T. Takeda, T. Suzuki, H. Watanabe, N. Watanabe, Y. Yamada, M. Oyamada and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)*.
16. Order-Disorder Transformation of Interstitial Deuterium Atoms in the Ta-D System.
H. Asano, S. Yamaguchi, M. Hirabayashi, N. Watanabe, N. Niimura, Y. Yamada and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 E (1972)*.

17. Spatial Distribution of Neutrons in a Lead Assembly Produced by a 200 MeV Electron Beam Bombardment.
T. Yano, Y. Yamazaki, T. Egusa, N. Watanabe, M. Oyamada and M. Kimura : *Euratom Report EUR-4954 E* (1972).
18. The Application of the Neutron Time-of Flight Spectrometry to Searching the Forbidden (666) Reflection in Silicon.
N. Niimura and M. Kimura : *J. Phys. Soc. Jpn.* **33** (1972) 1493.
19. Anisotropic Scattering of Neutrons from Uniaxially Oriented Isopolypropylene.
T. Yasukawa, M. Kimura and N. Watanabe : *Repts. Polymer Phys. Jpn.* **15** (1972) 139.
20. Neutron Inelastic Scattering Spectra and Phase Transition of 1,2-Dichloroethane Crystal.
A. Ozora, M. Itoh, N. Niimura and N. Watanabe : *Chem. Phys. Lett.* **18** (1973) 306.
21. Magnetic Structure of $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Sb}$.
T. Yashiro, Y. Yamaguchi, S. Tomiyoshi and H. Watanabe : *J. Phys. Soc. Jpn.* **34** (1973) 58.
22. On the Anomalous Properties of Liquid Copper Alloys.
S. Takeuchi, K. Suzuki, F. Itoh, K. Kai, M. Misawa and K. Murakami : *Proc. Second Int. Conf. the Propertie of Liquid Metals*, (Taylor and Francis Ltd., London, 1973) p. 69.
23. High Momentum Transfer Structure Factor of Liquid Bromine by T-O-F Neutron Diffraction.
M. Misawa, Y. Fukushima, K. Suzuki and S. Takeuchi : *Phys. Lett.* **45A** (1973) 273.
24. Direct Observation of Transient Phenomena by the Neutron Time-of-Flight Method.
N. Niimura and M. Muto : *J. Phys. Soc. Jpn.* **35** (1973) 628.

25. Neutron Paramagnetic Scattering with a Pulsed Neutron Source of an Electron Linac.
N. Watanabe, Y. Ishikawa and K. Tsuzuki : Nucl. Instrum. Methods **120** (1974) 293.
26. Neutron Diffraction and Paramagnetic Scattering from a High Pressure Phase of MnGeO_3 (Ilmenite).
K. Tsuzuki, Y. Ishikawa, N. Watanabe and S. Akimoto : J. Phys. Soc. Jpn. **37** (1974) 1242.
27. Epithermal Neutron Diffraction from a Gadolinium Alloy ($\text{Gd}_{0.9}\text{Y}_{0.1}$).
Y. Ishikawa, N. Watanabe, K. Tajima and H. Sekine : Phys. Lett. **48A** (1974) 195.
28. Neutron Diffraction from Nematic Liquid Crystal.
N. Niimura : Phys. Lett. **48A** (1974) 375.
29. The Liquid Structure of Bromine.
N. Niimura : Phys. Lett. **48A** (1974) 337.
30. Preliminary Optimization of Peak Thermal Neutron Flux in JLB.
N. Watanabe and T. Asaoka : *Proc. Symp. Intense Pulsed Neutron Source, Tokyo, 1975*, p. 263.
31. Structure of Liquid Gallium and Rubidium by Pulsed Neutron Diffraction Using Electron Linac.
K. Suzuki, M. Misawa and Y. Fukushima : Trans. JIM **16** (1975) 297.
32. Analysis of Transient Crystal and Liquid Structure Phenomena Using Neutron Time-of-Flight Techniques.
N. Niimura and M. Muto : Nucl. Instrum. and Methods **125** (1975) 87.
33. Neutron Time-of Flight Techniques for Investigation of the Extinction Effect.
N. Niimura, S. Tomiyoshi, J. Takahashi and J. Harada : J. Appl. Cryst. **8** (1975) 560.
34. Neutron Diffraction Study of an Amorphous $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ Alloy with TOF Technique.
T. Mizoguchi, K. Yamaguchi and N. Niimura : Jpn. J. Appl. Phys. **14** (1975) 711.

35. Neutron Diffraction from Nematic Liquid Crystalline Phase Isotropic Phase of Paraazoxyanisole.
N. Niimura : *Molecular Cryst. and Liquid Cryst.* **25** (1975) 123.
36. Helical Spin Structure of Mn_3Si .
S. Tomiyoshi and H. Watanabe : *J. Phys. Soc. Jpn.* **39** (1975) 295.
37. Study of the Extinction Effect by Means of the Time of Flight Neutron Diffraction Method.
J. Takahashi, J. Harada and N. Niimura : *Acta Cryst.* **A31** (1975) S248.
38. Epithermal Neutron Diffraction from Natural Gd Compounds.
Y. Ishikawa, N. Watanabe, H. Sekine, K. Tajima and K. Takei : *Proc. Neutron Diffraction Conf.* (Petten, 1975) p.360.
39. Time of Flight Pulsed Neutron Diffraction of $Pd_{0.8}Si_{0.2}$ Amorphous Alloy Using the Electron Linac.
K. Suzuki, T. Fukushima, M. Misawa and T. Masumoto : *Proc. 2nd Int. Conf. Rapidly Quenched Metals, MIT, 1977.*
40. Neutron Inelastic Scattering Spectra and Lattice Vibrations of 9, 10-Anthraquinone Crystal.
Y. Miyazaki and M. Itoh : *Chem. Phys. Lett.* **33** (1975) 121.
41. An Optimization Study of Peak Thermal Neutron Flux in Moderators of Advanced Repetitive Pulse Reactors.
T. Asaoka and N. Watanabe : *Proc. US/Japan Seminar on Fast Pulsed Reactor, Tokyo, 1976*, p. 643.
42. Spin Dynamics, in a Heusler Alloys Pd_2MnSn .
Y. Noda and Y. Ishikawa : *J. Phys. Soc. Jpn.* **40** (1976) 699.
43. Localized Modes in Tantalum Hydrides Studied by Neutron Inelastic Scattering.
R. Yamada, N. Watanabe, K. Sato, H. Asano and M. Hirabayashi : *J. Phys. Soc. Jpn.* **41** (1976) 85.

44. Time-of-Flight Pulsed Neutron Diffraction of $\text{Pd}_{0.8}\text{-Si}_{0.2}$ Amorphous Alloy Using the Electron Linac.
K. Suzuki, T. Fukunaga, M. Misawa and T. Masumoto : Materials Sci. Eng. **23** (1976) 215.
45. Structural Study of Liquids with Strong Short-Range Correlation in the Atomic Distribution.
K. Suzuki : Bunsen-Gesellschaft Phys. Chem. **80** (1976) 689.
46. Short Range Structure of Amorphous and Liquid Iron and $\text{Pd}_{0.8}\text{-Si}_{0.2}$ Alloy.
K. Suzuki, T. Fukunaga, M. Misawa and T. Masumoto : Sci. Report RITU **A26** (1976) 1.
47. A Comment of Short-Range Structure of Viterious As_2Se_3 Observed in High Momentum Transfer Region.
K. Suzuki, M. Misawa, Y. Fukushima, K. Igaki and S. Itoh : Sci. Report RITU **A26** (1976) 55.
48. Martensitic Transformation of Intermetallic Compound $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{47}\text{Fe}_3$.
M. Matsumoto and T. Honma : Trans. JIM **17** (1976) 199.
49. Structure of Liquid and Amorphous Selenium by Pulsed Neutron Diffraction Using an Electron LINAC.
K. Suzuki and M. Misawa : Inst Phys. Conf. Ser. **30** (1977) 531.
50. A Proposed Structure Model for Amorphous $\text{Pd}_{0.8}\text{Si}_{0.2}$ Alloy.
T. Fukunaga, T. Ichikawa and K. Suzuki : *Amorphous Magnetism II*, eds.
R. A. Levy and R. Hasegawa (Plenum Presss, 1977) p.521.
51. Time-of-Flight Pulsed Neutron Diffraction of Liquid Using an Electron LINAC.
K. Suzuki, M. Misawa, K. Kai and N. Watanabe : Nucl. Instrum. and Methods **147** (1977) 519.
52. Structure of Chain Molecule in Liquid Selenium by Time-of-Flight Pulsed Neutron Diffraction.
M. Misawa and K. Suzuki : Trans. JIM **18** (1977) 427.

53. The Structure of NO_3^- in Molten Monovalent Metal Nitrates by Pulsed Neutron Diffraction.
K. Suzuki and Y. Fukushima : *Z. Naturforsch.* **32a** (1977) 1438.
54. Target-Moderator Mock-up Experiment for KENS.
N. Watanabe, M. Misawa and S. Yamaguchi : *Proc. 2nd Meeting Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources, Rutherford Lab., July 10-15, 1978.*
55. The Structure of Metal-Metal Amorphous Alloy $\text{Cu}_{0.57}\text{Zr}_{0.43}$ Determined by Neutron Diffraction.
T. Mizoguchi, T. Kudo, T. Irisawa, N. Watanabe, N. Niimura, M. Misawa and K. Suzuki : *Rapidly Quenched Metals III*, ed. B. Cantor (The Metal Soc. London, 1978) p.384.
56. Atomic Short Range Order in Cu_3Mn Studied by TOF Neutron Diffraction.
M. Hirabayashi, M. Koiwa, S. Yamaguchi and K. Kamata : *J. Phys. Soc. Jpn.* **45** (1978) 1591.
57. Partial Structure Factor of Amorphous $\text{Cu}_{0.57}\text{Zr}_{0.43}$ Alloy Determined by TOF Pulsed Neutron Diffraction.
T. Kudo, T. Mizoguchi, N. Watanabe, N. Niimura, M. Misawa and K. Suzuki : *J. Phys. Soc. Jpn.* **45** (1978) 1773.
58. Ring-Chain Transition in Liquid Selenium by a Disordered Chain Model.
M. Misawa and K. Suzuki : *J. Phys. Soc. Jpn.* **44** (1978) 1612.
59. Compositional Study on Short-Range structure of Pd-Si and Fe-B Amorphous Alloys.
T. Fukunaga, M. Misawa, K. Fukamachi, T. Masumoto and K. Suzuki : *Rapidly Quenched Metals III*, ed. B. F. Cantor (The Metal Soc. London, 1978) p.325.
60. Ferrielectricity in Copper Formate Tetrahydrate.
I. Suzuki and K. Okada : *J. Phys. Soc. Jpn.* **47** (1979) 1023.

61. Structure Characterization of CVD Amorphous Si_3N_4 by Pulsed Neutron Total Scattering.
M. Misawa, T. Fukunaga, K. Niihara, T. Hirai and K. Suzuki :
J. Non-Crystalline Solids **34** (1979) 313.
62. Neutron Diffraction Study of Electric Field Effects of a Nematic Liquid Crystal.
N. Niimura : J. Phys. Soc. Jpn. **47** (1979) 2039.
63. Magnetic Structure of $\text{GdCu}_{1-x}\text{Zn}_x$ System.
K. Takei, Y. Ishikawa, N. Watanabe and K. Tajima : J. Phys. Soc. Jpn. **47**
(1979) 88.
64. Neutron Diffraction Studies of Atomic Structures of Amorphous Fe-Ge and Ni-Ge Alloys.
K. Yamada, Y. Endoh, Y. Ishikawa and N. Watanabe : J. Phys. Soc. Jpn. **48**
(1980) 922.
65. Time of Flight Single Crystal Diffractometer Using a Position Sensitive Detector.
N. Niimura, T. Kubota, M. Sato, M. Arai and Y. Ishikawa : Nucl. Instrum.
and Methods **173** (1980) 517.
66. An Experimental Derivation of Partial Structure Functions of Amorphous $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$ Alloys Using Combination of X-ray, Electron and Neutron Diffraction Experiments.
T. Fukunaga and K. Suzuki : Sci. Rep. RITU **A28** (1980) 208.
67. Concentration Fluctuation in $\text{Tl}_2\text{Te-Tl}$ Liquid System by Time-of-Flight Quasielastic Neutron Scattering Measurement.
K. Kai, S. Ukai and K. Suzuki : J. Phys. Soc. Jpn. **48** (1980) 2048.
68. The Short-Range Structure of Alkali Disilicate Glasses by Pulsed Neutron Total Scattering.
M. Misawa, D. L. Price and K. Suzuki : J. Non-Cryst. Solids **37** (1980) 85.
69. Pair Ordering in Disordered Chain Molecules of $\text{Se}_{0.25}\text{-Te}_{0.75}$ Liquid by Pulsed Neutron Total Scattering.
M. Misawa and K. Suzuki : J. Phys. (Paris), Colloq. **C8** (1980) 203.

70. A Correlation between Atomic and Electronic Structure of Fe-B Amorphous Alloys.
K. Suzuki, F. Itoh, M. Matsuura and T. Fukunaga : J. Phys (Paris), Colloq.
C8 (1980) 179.
71. Radial Distribution Function of Pd-Si Alloy Glasses by Pulsed Neutron Total
Scattering Measurements and Geometrical Structure Relaxation Simulations.
T. Fukunaga and K. Suzuki : Sci. Rep. RITU **A29** (1981) 153.
72. High Resolution Local Coordination in Glassy States by Pulsed Neutron Total
Scattering.
K. Suzuki, M. Misawa, T. Fukunaga and N. Hayashi : *Prof. Conf. Metallic
Glasses ; Science and Technology*, eds. C. Hargitai et al. (Hungarian Foreign
Trading Company, Budapest, 1981) Vol. 1, p.327.
73. Neutron Scattering Facilities at the Tohoku University Electron LINAC,
K. Suzuki, N. Niimura, T. Kajitani, K. Kai, Y. Endoh, S. Tomiyoshi,
K. Yamada and S. Yamaguchi : *Proc. 4th ICANS, 1981*, p.485.
74. Development of ^6Li Glass Scintillator in Japan.
N. Niimura, A. Matsumoto, M. Kariya and S. Hoshino : *ibid.* p.635.
75. Neutron TOF Diffraction Studies of FeV_2S_4 and Fe_2VS_4 .
I. Kawada and H. Wada : *Physica* **105B** (1981) 223.
76. Application of Position Sensitive Detectors to structure Analysis Using Pulsed
Neutron Sources.
N. Niimura, Y. Ishikawa, M. Arai and M. Furusaka : *AIP Conf. Proc. No.89*
(1982) p. 11.
77. Pulsed Neutron Scattering Study on Amorphous Zirconium-Nickel Hydride and
Deuterides.
M. Hirabayashi, H. Kaneko, T. Kajitani, K. Suzuki and M. Ueno : *ibid.* p. 87.
78. Hydrogen and Deuterium Atomic in Amorphous Zr-Ni Alloys.
H. Kaneko, T. Kajitani, M. Hirabayashi, M. Ueno and K. Suzuki :
J. Less-Common Metals **89** (1983) 237.
79. Structure and Properties of Amorphous Metal Hydrides.
K. Suzuki : *J. Less-Common Metals* **89** (1983) 183.

80. On the Change in Coordination of Ge Atoms in $\text{Na}_2\text{O-GeO}_2$ Glasses.
M. Ueno, M. Misawa and K. Suzuki : *Physica* **120B** (1983) 347.
81. Position Sensitive Neutron Detectors Using ^6Li Glass Scintillators.
N. Niimura, K. Yamada, T. Kubota, A. Matsumoto and S. Hoshino :
Physica **120B** (1983) 104.
82. Position Sensitive Neutron Detectors Using ^6Li -Glass Scintillator and Fibre Optic
Encoding.
N. Niimura, K. Yamada, T. Kubota, A. Matsumoto and S. Hoshino : *Nucl.*
Instrum. and Methods **211** (1983) 203.
83. ^6Li ガラスシンチレーター中性子位置検出器.
新村信雄 : *日本結晶学会誌* **24** (1983) 396.
84. Neutron Diffraction Study on the β_1 - β_2 Transition in Ta_2D .
H. Kaneko, T. Kajitani, M. Hirabayashi, N. Niimura, A. J. Schultz and
P. Leug : *J. Less-Common Metals* **103** (1984) 45.
85. Site Occupation and Local Mode of Hydrogen in $\text{ZrO}_{0.4}$ Studied by Time-of-Flight
Neutron Scattering.
S. Mukawa, T. Kajitani and M. Hirabayadhi : *J. Less-Common Metals* **103**
(1984) 19.
86. Site Occupation and Local Vibration of Hydrogen Isotopes in Hexagonal
 $\text{Ti}_5\text{Si}_3\text{H(D)}_{1-x}$.
T. Kajitani, T. Kawase, K. Yamada and M. Hirabayashi : *Trans. Jpn. Inst.*
Metals **27** (1986) 639.
87. Short Range Structural Analysis of Lead Silicate Glasse by Pulsed Neutron Total
Scattering.
K. Yamada, A. Matsumoto, N. Niimura, T. Fukunaga, H. Hayashi and N.
Watanabe : *J. Phy. Soc. Jpn.* **55** (1986) 831.
88. Crystal Structure of Tetragonal $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-\delta}\text{Co O}_{7-\delta}$ ($\delta=0.03$).
T. Kajitani, K. Kusuda, M. Kikuchi, Y. Syono and M. Hirabayashi : *Jpn.*
J. Appl. Phys. **26** (1987) L1727.

89. Displacement Waves in $\text{La}_2\text{CuO}_{4-\delta}$ and $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$.
T. Kajitani, T. Onozuka, Y. Yamaguchi, M. Hirabayashi and Y. Syono : Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1877.
90. Crystal Structures of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-\delta\text{A}_\delta\text{O}_9-\delta$ (A=Ni, Zn & Co).
T. Kajitani, K. Kusada, M. Kikuchi, Y. Syono and M. Hirabayashi : Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) L354.
91. Temperature Dependence of Thermal Motion and Position of Hydrogen in KH_2AsO_4 Studied by Neutron Diffraction Structure Analysis.
M. Matsuda, N. Niimura, S. Kawano, A. Nonaka and N. Yamada : J. Phys. Soc. Jpn. **57** (1988) 3824.
92. Exchange Interactions in Cubic Perovskite Type SrMnO_3 and SrFeO_3 Ferrites.
T. Takeda, S. Komura and N. Watanabe : *Proc. Int. Conf. Sept.-Oct., 1990, Japan*, p.385.

IV R I 関係

分類 : (a)核分光, 核物性, 核化学 (b)放射化学, ホットアトム化学 (c)放射化分析 (基礎, 応用) (d)R I 調製 : トレーサー化学 (e)R I 調製 : 医学利用 (f)工学への応用

1 - b Specific Features in Thermal Annealing of Recoil Bromine Atoms Produced in Potassium Bromate.

T. Shiokawa, T. Sasaki and S. Takahashi : Radiochem. Radioanal. Lett. **1** (1969) 31.

2 - c The Yields of Photonuclear Reactions in Titanium and Vanadium with Bremsstrahlung up to 60 MeV.

Y. Oka, T. Kato and N. Sato : Bull. Chem. Soc. Jpn. **42** (1969) 387.

3 - c The Yields of Photonuclear Reactions Leading to the Production of Beryllium-7 with Bremsstrahlung up to 60 MeV.

Y. Oka, T. Kato and A. Yamada : Bull. Chem. Soc. Jpn. **42** (1969) 981.

4 - a The 2.216 MeV 0^+ Excited State of ^{142}Nd Studied by the Decay of ^{142}Sm .

S. Hayashibe, Y. Endo and T. Ishimatsu : J. Phys. Soc. Jpn. **29** (1970) 235.

5 - b Chemical Behaviour of the Recoil ^{57}Co Formed by the Decay of ^{57}Ni -Labelled Hexamminenickel (II) Complexes.

T. Omori, S-C. Wu and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **3** (1970) 405.

6 - b A Study of the Chemical Behaviour of Recoil Atoms by the $^{115}\text{In} (\gamma, \gamma')$ ^{115m}In In Process.

K. Yoshihara, M-H. Yang and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **4** (1970) 143.

7 - b The Thermal Annealing Behaviour of ^{80}Br Recoils Produced by the Nuclear Isomeric Transition in Alkali Metal Bromates.

T. Sasaki and T. Shiokawa : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 2835.

8 - b Comparison of Isomeric Transition-Activated ^{80}Br Reaction in $\text{CH}_4\text{-H}^{80m}\text{Br}$ System.

M. Yagi and K. Kondo : Radiochem. Radioanal. Lett. **5** (1970) 75.

9 - a The Yields of $^{133}\text{Cs} (\gamma, xn)$ and $^{133}\text{Cs} (\gamma, 2pxn)$ Reactions with 150, 200 and

250 MeV Bremsstrahlung.

T. Kato, H-T. Tsai and Y. Oka : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 576.

- 10- c Determination of Niobium by Photon-Activation Analysis Based on Internal-Reference Method.

Y. Oka, T-C. Pung and T. Saito : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 1083.

- 11- c Photon-Activation Analysis for Iodine by Using Cesium as the Internal-Reference Element.

H-T. Tsai, T. Kato and Y. Oka : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 2482.

- 12- c An Internal-Reference Method for the Datermination of Rubidium by Photon-Activation Analysis with Strontium Used as the Reference Element.

H-T. Tsai, T. Kato and Y. Oka : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 2823.

- 13- c セレンを内基準元素とするヒ素の光量子放射化分析

岡好良, 加藤豊明, 河南良英 : 分析化学 **18** (1970) 971.

- 14- d Studies of the Behaviour of Trivalent Uranium in an Aqueous Solution **III**. Extraction from a Hydrochloric Acid Solution by Bis (n-Butyl) Orthophosphoric Acid and by Bis (2-Ethylhexyl) Orthophosphoric Acid.

S. Sato and S. Suzuki : Bull. Chem. Soc. Jpn. **43** (1970) 1380.

- 15- a Decay of 14 min ^{112}In .

S. Itagaki, Y. Takeda and K. Sugiyama : J. Phys. Soc. Jpn. **30** (1971) 923.

- 16- a The Decay of ^{164m}Ho and ^{164g}Ho to ^{164}Dy and ^{164}Er .

H. Kaji, Y. Tamaki and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **10** (1971) 151.

- 17- b Thermal Annealing Behavior of the Recoil ^{57}Co Formed by the Decay of ^{57}Ni -Labeled Hexamminenickel (**II**) Complexes.

T. Omori, S-C. Wu and T. Shiokawa : Bull. Chem. Soc. Jpn. **44** (1971) 1014.

- 18- b Effects of Cationic Components on Thermal Annealing of Bromine Recoils in Alkali Metal Bromates.

T. Shiokawa, T. Sasaki and S. Takahasahi : Radiochem. Radioanal. Lett. **6** (1971) 327.

- 19- b Some Experimental Date Conflicting with the "Explosion Model" in Gaseous

Bromides.

Y. Takita, M. Hiraga, K. Yoshihara and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **7** (1971) 313.

20- b The Effect of the Krypton Moderator on the Isomeric Transition-Induced Reactions of ^{80}Br with CH_4 .

M. Yagi, K. Kondo and T. Kobayashi : Bull. Chem. Soc. Jpn. **44** (1971) 580.

21- b Differences Between the Reactions of Gaseous CH_4 with ^{80}Br and ^{82}Br Activated by Isomeric Transition.

M. Yagi, K. Kondo and T. Kobayashi : Radiochem. Radioanal. Lett. **7** (1971) 275.

22- b Differences Between the Reactions of Gaseous CH_3Br With ^{80}Br and ^{82}Br Activated by Isomeric Transition.

T. Shiokawa, T. Kobayashi, K. Kondo and M. Yagi : Radiochem. Radioanal. Lett. **7** (1971) 281.

23- c Photon-Activation Analysis for Zirconium with Molybdenum Used as the Internal-Reference Element.

T-C. Pung, T. Kato and Y. Oka : Bull. Chem. Soc. Jpn. **44** (1971) 1031.

24- c The Photoneuclear Reactions Leading to ^{24}Na and ^{28}Mg .

T. Saito : Bull. Chem. Soc. Jpn. **44** (1971) 1800.

25- c 18-75 MeV 制動輻射によるセシウムおよびバリウムの光核反応とセシウムの内基準放射化分析

蔡惠沢 : 日化誌 **92** (1971) 60.

26- c セシウムを内基準元素とするルビジウムの光量子放射化分析

蔡惠沢 : 日化誌 **92** (1971) 93.

27- c 10-68 MeV 制動輻射による(γ , n) 反応の収率

齊藤達弥 : 日化誌 **92** (1971) 164.

28- b The Effect of Solvents on the Adduct Formation of Uranyl Thenoyltrifluoroacetate with Tributylphosphate.

K. Akiba and N. Suzuki : Bull. Chem. Soc. Jpn. **44** (1971) 1043.

29- d Regularities of Extraction of Uranyl Thenoyltrifluoroacetate into a Number

of Solvents.

- K. Akiba, N. Suzuki, H. Asano and T. Kanno : J. Radioanal. Chem. **7** (1971) 203.
- 30— a A Note on the Decay of ^{126}I to ^{126}Te and ^{126}Xe .
H. Kaji, Y. Tamaki and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **10** (1972) 161.
- 31— b Difference between the Appearance Energies of Recoil Species from Indium and Lutetium EDTA Complexes.
K. Yoshihara and T. Mizusawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **9** (1972) 263.
- 32— c Yields of Photonuclear Reactions for Photon-Activation-Analysis with High-Energy Bremsstrahlung.
T. Kato and Y. Oka : Talanta **19** (1972) 515.
- 33— e Preparation of Carrier-Free Gallium-67 for Medical Application.
M. Yagi and K. Kondo : Chem. Lett. **1972**, 215.
- 34— d Extraction of Uranyl 2 -Thenoyltrifluoroacetate Complexes into Alcohol, Ketone, Ether and Ester Solvents.
K. Akiba, N. Suzuki and T. Kanno : Anal. Chem. Acta **58** (1972) 379.
- 35— b Charge Spectrometry of Decayed Atoms in Some Alkly Halides. Existence of Parent Ions and Their Hydrogen-Deficient Species.
G. Izawa, K. Nagashima, K. Yoshihara and T. Shiokawa : Mass Spectroscopy **21** (1973) 179.
- 36— b Reactions of the Isomeric Transition-Activated ^{82}Br in the $\text{H}^{82\text{m}}\text{Br}$ System.
M. Yagi, K. Kondo and T. Kobayashi : Radiochem. Radioanal. Lett. **14** (1973) 123.
- 37— c Quantitative Evaluation of the Photon-Activation Method in Analysis.
T. Kato : J. Radioanal. Chem. **16** (1973) 307.
- 38— c Non-Destructive Photon-Activation Analysis of Standard Rocks with 30 MeV Bremsstrahlung.
T. Kato, I. Morita and N. Sato : J. Radioanal. Chem. **18** (1973) 97.
- 39— d The Preparation of Carrier-Free Potassium-43 Combined with Potassium-42

from Calcium Hydroxide Using a Linear Accelerator.

C-M. Tsai, G. Izawa and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **13** (1973) 179.

40- d Synergistic Extraction of Uranyl Complexes with TTA-TBPO Mixtures into Various Solvents.

K. Akiba : J. Inorg. Nucl. Chem. **35** (1973) 3323.

41- a γ - γ Angular Correlations in Liquid Alloys.

A. Furusawa, S. Tamaki and Y. Watase : Phys. Lett. **49A** (1974) 121.

42- a The Yield Distribution of Radioactive Nuclides Produced by Photospallation Reactions in ^{133}Cs and ^{139}La with 250 MeV Bremsstrahlung.

T. Kato and H-T. Tsai : J. Inorg. Nucl. Chem. **36** (1974) 1.

43- b 核壊変の化学的効果 (解説)

塩川孝信, 吉原賢二, 八木益男, 大森巍 : 日本原子力会誌 **16** (1974) 409.

44- b Radiosynthesis of Indium Phthalocyanine Complex by Ion Implantation.

K. Yoshihara, M. Kishimoto, M. Takahashi, S. Suzuki and T. Shiokawa : Radiochim. Acta **21** (1974) 148.

45- c Multielement Photon Activation Analysis of Rock Materials with 30 MeV Bremsstrahlung.

N. Sato, T. Kato and N. Suzuki : Radiochim. Acta **21** (1974) 63.

46- b Chemical Effect of the K_{β}/K_{α} Intensity Ratios in the ^{51}Cr -Labeled Chromium Compounds.

Y. Tamaki, T. Omori and T. Shiokawa : Radiochim. Radioanal. Lett. **20** (1975) 255.

47- b Evidences of Ion-Cluster Formation on the Reaction of (I. T.)-Activated ^{80}Br in $\text{H}^{80\text{m}}\text{Br}-\text{CH}_4$ System.

M. Yagi and K. Kondo : Radiochem. Radioanal. Lett. **77** (1975) 299.

48- c Determination of Nickel in Standard Rocks and Glasses by Photon Activation Analysis with 30 MeV Bremsstrahlung.

T. Kato, E. Kitazume and N. Suzuki : Anal. Chem. Acta **77** (1975) 117.

49- d Preparation of Carrier-Free ^{28}Mg Means of Photonuclear Reaction.

- M. Yagi, A. Yamadera, S. Fujikawa and T. Shiokawa : *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **26** (1975) 637.
- 50- e Photoproduction of High Specific Activity of Thulium-167 for Medical Use.
K. Sakamoto, Y. Shirota, A. Ando and K. Hisada : *J. Nucl. Med.* **12** (1975) 128.
- 51- e Affinity for a Malignant Tumor and Bone of Thulium-167.
A. Ando, K. Hisada, K. Sakamoto and Y. Shirota : *Jpn. J. Nucl. Med.* **12** (1975) 143.
- 52- e ^{167}Tm のがんおよび骨親和性
安東醇, 久田欣一, 坂本浩, 代田悦章 : *Radioisotopes* **24** (1975) 109.
- 53- a Perturbed Angular Correlation of ^{111}Cd in Liquid In-Bi Alloys.
Y. Tsuchiya, S. Tamaki and A. Furusawa : *J. Phys. F* **6** (1976) 2009.
- 54- b (γ , n) Recoils of ^{58}Co and ^{64}Cu in the Mixed Crystals of Metal Phthalocyanines.
O. Kujirai, N. Ikeda and H. Shoji : *Radiochem. Radioanal. Lett.* **26** (1976) 5.
- 55- c The Yields of Photonuclear Reactions for Multielement Photon Activation Analysis.
T. Kato, K. Masumoto, N. Sato and N. Suzuki : *J. Radioanal. Chem.* **32** (1976) 51.
- 56- c Multielement Photon Activation Analysis of Biological Materials.
T. Kato, N. Sato and N. Suzuki : *Anal. Chim. Acta* **81** (1976) 337.
- 57- c Non-Destructive Multielements Photon Activation Analysis of Environmental Materials.
T. Kato, N. Sato and N. Suzuki : *Talanta* **23** (1976) 517.
- 58- f ゼオライトによる放射性廃液の処理 (I). Na型, Ca型およびSr型ゼオライトの加熱変化
菅野卓治, 三村均, 北村強 : *日本原子力会誌* **18** (1976) 518.
- 59- a The g-Factor of the 2140.2 keV 5^- State in ^{136}Ba .
M. Ohshima, S. Hayashibe, N. Kawamura, Y. Itoh, M. Fujioka and T. Ishimatsu : *Proc. Int. Conf. Nucl. Structure, Contributed papers, Tokyo 1977*, p. 370.

- 60- a Recoil Damage in InSb and InP Observed by Perturbed Angular Correlation with ^{111}Cd .
K. Matsui and T. Shoji : *Proc. Radiation Effects in Semiconductors, Dubronik 1976*, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 31 (1977) chap. 5, p. 379.
- 61- b Appearance Energies of Indium Complex Compounds Determined by the ^{115}In (γ , γ') $^{115\text{m}}\text{In}$ Reaction.
K. Yoshihara, A. Fujita and T. Shiokawa : *J. Inorg. Nucl. Chem.* **39** (1977) 2111.
- 62- b Radiochemical Synthesis of Promethium Dipivaloylmethanate.
M. Sakanoue, Y. Shirota, H. Shimozawa and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **24** (1977) 77.
- 63- c Multielements Datermination in Tobacco Leaves by Photon Activation Analysis.
N. Sato, T. Kato and N. Suzuki : *J. Radioanal. Chem.* **36** (1977) 221.
- 64- c New Irradiation System for Photon Activation Analysis by Electron Linear Accelerator.
M. Yagi and K. Kondo : *J. Radioanal. Chem.* **36** (1977) 247.
- 65- c Multielement Analysis of Deep-sea Sediments by Photon Activation.
T. Kato, N. Sato and N. Suzuki : *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **50** (1977) 1930.
- 66- d Preparation of Carrier-Free ^{45}Sc by the ^{48}Ti (γ , p) Reaction.
M. Yagi and K. Kondo : *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **28** (1977) 463.
- 67- d Preparation of Carrier-Free $^{69\text{m}}\text{Zn}$ by the ^{71}Ga (γ , pn) Reaction.
M. Yagi and K. Kondo : *Radiochem. Radioanal. Lett.* **30** (1977) 173.
- 68- d 加速器によるラジオアイソトープの製造 (II) (総説)
塩川孝信, 吉原賢二, 八木益男, 近藤健次郎 : *Radioisotopes* **26** (1977) 425.
- 69- d Synergistic Extraction of Uranyl Thenoyltrifluoroacetate with Trioctyl-Phosphine Oxide.
K. Akiba : *J. Radioanal. Chem.* **36** (1977) 153.
- 70- d Preparation of Uranium-230 as a New Uranium Tracer.
T. Hashimoto, K. Kido and T. Sotobayashi : *Radiochem. Radioanal. Lett.*

- 28 (1977) 385.
- 71- c Photon and Charged-Particle Productions of Carrier-Free Tm-167 for Medical Use.
K. Sakamoto, Y. Shiota, K. Nazono, K. Komura, A. Ando and K. Hisada :
J. Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals **13** (1977) 191.
- 72- e ^{167}Tm の製造とそれがんおよび骨親和性の研究
久田欣一, 鈴木豊, 安東醇, 坂本浩, 代田悦章 : 成人病の研究 **2** (1977) 50.
- 73- f ゼオライトによる放射性廃液の処理 (II). ゼオライト焼成固化体からの Cs およ
び Sr の浸出性
菅野卓治, 三村均 : 日本原子力会誌 **19** (1977) 113.
- 74- f ゼオライトによる放射性廃液の処理 (III). ゼオライト耐酸性および天然ゼオライ
ト焼成体からの Cs および Sr の浸出性
菅野卓治, 三村均 : 日本原子力会誌 **19** (1977) 170.
- 75- f Diffusion of ^{28}Mg in Aluminum.
S. Fujikawa and K. Hirano : Mater. Sci. Eng. **27** (1977) 25.
- 76- b Hot Atom Chemistry of Radioactive Cobalt in Tris (β -diketonato) Cobalt (III).
T. Akimoto, T. Omori and T. Shiokawa : Radiochem. Radioanal. Lett. **36**
(1978) 21.
- 77- b Reactions of Isomeric Transition-Activated ^{80}Br in the $\text{H}^{80\text{m}}\text{Br}-\text{CH}_4$ System.
K. Kondo and M. Yagi : Bull. Chem. Soc. Jpn. **51** (1978) 372.
- 78- b Isotope Effect in Thermal Ionic Reactions of Isomeric Transition-Activated ^{80}Br
and ^{82}Br in the $\text{HBr}-\text{CH}_4$ System.
K. Kondo and M. Yagi : Bull. Chem. Soc. Jpn. **51** (1978) 1284.
- 79- c Activation Yield Curves of Photonuclear Reactions for Multielement Photon
Activation Analysis.
K. Masumoto, T. Kato and N. Suzuki : Nucl. Instrum. and Methods **157** (1978)
567.
- 80- c Selective Coincidence Spectrometry in the Nondestructive Determination of Nick-
el in Geological Materials with High-Energy Photon Activation.
K. Masumoto and N. Suzuki : J. Radioanal. Chem. **46** (1978) 121.

- 81— d Preparation of Carrier-Free ^{67}Cu by the $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$ Reaction.
M. Yagi and K. Kondo : *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **29** (1978) 757.
- 82— f Impurity Diffusion in Aluminum.
K. Hirano and S. Fujikawa : *J. Nucl. Mater.* **69/70** (1978) 564.
- 83— a Magnetic Moment of the 2140.2 keV 5^- State in ^{136}Ba .
M. Ohshima, S. Hayashibe, N. Kawamura, Y. Itoh, M. Fujioka and T. Ishimatsu : *Hyp. Int.* (1979) 103.
- 84— b Chemical Effects on the K_β/K_α Intensity Ratios of the Daughter Atoms Formed by EC Decay of ^{51}Cr and ^{54}Mn .
T. Tamaki, T. Omori and T. Shiokawa : *Radiochem. Radioanal. Lett.* **37** (1979) 34.
- 85— b Chemical Effects Associated with (γ, n) Reaction in Potassium Chromate.
T. Omori, T. Kikuchi and T. Shiokawa : *Radiochem. Radioanal. Lett.* **37** (1979) 233.
- 86— b Effect of Inorganic Additive on the Reactions of Isomeric Transition-Activated ^{80}Br and ^{82}Br in the Gaseous HBr-CH_4 System.
K. Kondo and M. Yagi : *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **52** (1979) 225.
- 87— d Redox Substoichiometric Determination of Arsenic in Biological Materials by Neutron Activation Analysis.
K. Kanda and N. Suzuki : *J. Radioanal. Chem.* **54** (1979) 7.
- 88— d Selective Substoichiometry of Arsenic (III) by Thionalide Extraction.
K. Kanda and N. Suzuki : *Radiochem. Radioanal. Lett.* **39** (1979) 221.
- 89— e Productions of ^{38}Cl and ^{38}S by Photonuclear Reactions Using Argon Gas Target.
M. Yagi, K. Kondo and A. Yamadera : *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **30** (1979) 123.
- 90— e A ^{62}Cu Generator.
M. Yagi and K. Kondo : *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **30** (1979) 569.
- 91— f Solid Solubility and Residual Resistivity of Scandium in Aluminum.
S. Fujikawa, M. Sugaya H. Takei and K. Hirano : *J. Less-Common Met.* **63** (1979) 87.

- 92— a *g* Factors of the 80 and 1094 keV States of ^{188}Er .
A. Fujikawa, M. Kanazawa and S. Hayashibe : Phys. Rev. C **21** (1980) 2575.
- 93— b Thermal Annealing Behavior of the Recoil ^{57}Co Produced by the $^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$ Reaction in Some Nickel Complexes.
T. Omori, S-C. Wu and T. Shiokawa : Radiochim. Acta **27** (1980) 187.
- 94— b Isomeric Transition-Activated ^{80}Br and ^{82}Br Reactions in the Gaseous CH_3Br - HBr System.
K. Kondo and M. Yagi : Bull. Chem. Soc. Jpn. **53** (1980) 304.
- 95— b A New Window Flow Counter for Counting Radio Gas-Chromatography Effluents.
K. Kondo and M. Yagi : J. Radioanal. Chem. **56** (1980) 7.
- 96— c Multielement Determination in Floor Sediments of the Japan Sea by Nondestructive Photon Activation Analysis.
T. Kato and M. Kato : J. Radioanal. Chem. **57** (1980) 105.
- 97— c Photon Activation Analysis of Trace Metals in Biological Materials Via Collection of Metal Tropolope-5-Sulfonate Complexes on to Anion-Exchange Resin.
M. Yamashita and N. Suzuki : J. Radioanal. Chem. **60** (1980) 73.
- 98— c A New Trace Element Standard Reference Materials with Polyacrylamide Gel Matrix for Radioactivation Analysis.
K. Masumoto and N. Suzuki : Radiochem. Radioanal. Lett. **42** (1980) 99.
- 99— d Liquid-Liquid Partition Constants of Tri-*n*-Octyl, Tris(2-Ethylhexyl) and Triphenyl Phosphine Oxides.
K. Akiba, M. Wada and T. Kanno : J. Inorg. Nucl. Chem. **42** (1980) 261.
- 100— e Production of ^{18}F by Means of Photonuclear Reactions and Preparation of Anhydrous H^{18}F .
M. Yagi and R. Amano : Int. J. Appl. Radiat. Isot. **31** (1980) 561.
- 101— b Radiochem Synthesis of New Acetylacetonate Complexes of Technetium and their Properties.
T. Sekine and K. Yoshihara : Radiochim. Acta **43** (1981) 139.
- 102— b Formation of Sublimable Tris(Acetylacetonato) Tc(III) by the (γ, p) Rea-

ction in Tris (Acetylacetonato) Ru (III).

K. Yoshihara, T. Omori and H. Kido : J. Inorg. Nucl. Chem. **43** (1981) 639.

103- b Determination of Niobium and Yttrium in GSJ Basalt JB- 1 by Photon Activation Analysis.

T. Kato and K. Masumoto : Geostand. Newslett. **5** (1981) 167.

104- d Substoichiometric Isotope Dilution Analysis for Uranium by Synergic Extraction.

N. Suzuki, K. Yoshida and H. Imura : Anal. Chim. Acta **129** (1981) 221.

105- d Substoichiometric Isotope Dilution Analysis of Calcium in Biological Materials.

M. Yuzawa and N. Suzuki : J. Radioanal. Chem. **62** (1981) 115.

106- e Production of Carrier-Free ³⁸K by Means of Photonuclear Reactions.

M. Yagi and R. Amano : Int. J. Appl. Radiat. Isot. **32** (1981) 225.

107- e A Simple and Rapid Synthetic Method for the Preparation of Carrier-Free ¹⁸F-Ethylfluoride.

M. Yagi, G. Izawa and Y. Murano : Radiochem. Radioanal. Lett. **49** (1981) 173.

108- a Hyperfine Field of ¹⁵⁶Gd in Tb (Zn_{1-x} Cu_x) with x= 0, 0.36, 0.46.

T. Shinohara, A. Furusawa, S. Hayashibe, S. Yamaguchi and T. Kamiyama : Hyp. Int. **12** (1982) 297.

109- b Synthesis of Tc and Pm Benzoiltrifluoroacetone Complexes by Recoil Implantation.

K. Yoshihara, M. Saito and T. Sekine : Radiochim. Acta **30** (1982) 25.

110- b Chemical Effects due to the (γ , n) Reaction and Isomeric Transition Studied by a Vacuum Sublimation Technique.

T. Sekine, M. Sakanoue, T. Nakamura and K. Yoshihara : Bull. Chem. Soc. Jpn. **55** (1982) 3795.

111- b A Study of Hot Atom Chemistry of Cadmium Tetraphenylporphyrin by the "Daughter Tracer Technique".

N. Arakawa, T. Sekine and K. Yoshihara : Radiochem. Radioanal. Lett. **52** (1982) 317.

- 112- e ^{115}Cd Photonuclear Production for ^{115}Cd - $^{166\text{m}}\text{In}$ Generator.
M. Yagi, R. Amano and G. Izawa : J. Radioanal. Chem. **68** (1982) 261.
- 113- e Rapid and High-Yield Synthesis of Carrier-Free ^{18}F -Labelled Alkyl Fluorides.
M. Yagi, Y. Murano and G. Izawa : Int. J. Appl. Radiat. Iso. **33** (1982) 1335.
- 114- f Self-Diffusion of ^{67}Cu in Copper.
S. Fujikawa and K. Hirano : *Proc. Int. Conf. Point Defect and Defect Interactions in Metals, 1981, Kyoto* (The University of Tokyo Press, 1978) p. 554.
- 115- f Cs および Sr 型合成モルデナイトの高温での再結晶ならびに再結晶相からの Cs および Sr の浸出性
三村均, 菅野卓治 : 日本原子力会誌 **24** (1982) 228.
- 116- a Hyperfine Interaction of ^{156}Gd in Tb ($\text{Zn}_{1-x}\text{Cu}_x$).
T. Shinohara, A. Furusawa, S. Hayashibe, S. Yamaguchi and T. Kamiyama : J. Magn. Magn. Mater. **31/34** (1983) 219.
- 117- b "Sum Peak Method" Applied to Study the Chemical Interaction between Indium and Bovine Serum Albumin.
K. Yoshihara, T. Omori, H. Kaji, Y. Suzuki and T. Mitsugashira : Radiochem. Radioanal. Lett. **58** (1983) 17.
- 118- b Hot Atom Chemistry of Copper and Zinc Phthalocyanine Mixed Crystals.
H. Shoji, Y. Oki and N. Ikeda : Radiochem. Radioanal. Lett. **58** (1983) 347.
- 119- c Vertical Distribution of Elements in Sediment Cores from the Japan Sea.
T. Kato, M. Endo and M. Kato : Mar. Geol. **53** (1983) 277.
- 120- c Stable-Isotope Dilution Activation Analysis, and Determination of Ca, Zn and Ce by Means of Photon Activation.
K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Chem. **79** (1983) 57.
- 121- c 光量子放射化分析法による日本海深海堆積物の諸元素存在度分布
加藤豊明, 角谷博樹, 加藤道雄, 鈴木信男 : 日化誌 **1983**, 49.
- 122- c 火山岩の化学組成と成因的考察—ニアムラギラ火山を例として
青木謙一郎 : 地球 **5** (1983) 565.
- 123- c 火成岩試料の機器光量子放射化分析
吉田武義, 榎本和義 : 地球 **5** (1983) 587.

- 124- d Equilibria and Kinetics of Uranium Extraction with 5 - 8 -Diethyl- 7 -Hydroxy-dodecan- 6 -One Oxime in Various Solvents.
K. Akiba and T. Kanno : Solvent Extraction & Ion Exchange **1** (1983) 729.
- 125- d Transport of Uranium (VI) through a Supported Liquid Membrane Containing LIX 63.
K. Akiba and T. Kanno : Sep. Sci. Technol. **18** (1983) 831.
- 126- f Photoluminescence and Electrical Properties of Undoped and Cl-Doped ZnSe.
S. Satoh and K. Igaki : Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) 68.
- 127- f Electric Properties of ZnSe.
S. Satoh, M. Isshiki and K. Igaki : Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) 1167.
- 128- a Photospallation Reactions of ^{133}Cs and ^{139}La by 100 MeV and 200 MeV Bremsstrahlung.
K. Sakamoto, H. Toramoto, Y. Hamajima, K. Okada and M. Dohniwa : Rediochim. Acta **37** (1984) 69.
- 129- a Spallation Yields from Natural Rb, Sr, and Y Irradiated with 100 MeV and 200 MeV Bremsstrahlung.
K. Sakamoto, M. Nishio, M. Dohniwa, K. Okada and Y. Hamajima : Rediochim. Acta **37** (1984) 83.
- 130- b 反跳イプランテーションによるテクネチウムなどの新物質の合成とその生成機構
吉原賢二, 関根勉 : 日化誌 **1984**, 1873.
- 131- c A New Internal Standard Method for Activation Analysis and its Applications. Determination of Co, Ni, Rb and Sr in Pepperbush by Means of Photon Activation.
M. Yagi K. Masumoto : J. Redioanal. Nucl. Chem. **A83** (1984) 319.
- 132- c A New Internal Reference Method for Activation Analysis and its Application. Determination of Ti, Cr, Ni and Zr in Aluminium Alloys by Means of Photon Activation.
M. Yagi and K. Masumoto : J. Radioanal. Nucl. Chem. **A83** (1984) 369.
- 133- c Determination of Zirconium in Biological Materials by Photon Activation Analysis.

- T. Sato : J. Radioanal. Nucl. Chem. **L86** (1984) 141.
- 134- c Sr Isotope Study of the Tephrite Series from Nyamuragira Volcano, Zaire.
K. Aoki and H. Kurasawa : Geochem. J. **18** (1984) 95.
- 135- b Column Chromatography of Carrier-Free Tc (**III**, **IV**) -TTA Complexes.
T. Okamoto, T. Omori and K. Yoishihara : J. Radioanal. Nucl. Chem. **L85** (1984) 245.
- 136- d Substoichiometric Determination of Manganese in a Synergistic Extraction System and Its Application to the Analysis of Biological Materials.
N. Suzuki, S. Nakamura and H. Imura : J. Radioanal. Nucl. Chem. **A81** (1984) 37.
- 137- d Synergistic Extraction of Manganese (**II**) with Thenoyltrifluoroacetone and Neutral Unidentate and Bidentate Ligands.
S. Nakamura, H. Imura and N. Suzuki : J. Radioanal. Nucl. Chem. **A82** (1984) 33.
- 138- d Extraction of Uranium (**IV**) by Emulsion Liquid Membrane Containing 5, 8 -Diethyl- 7 -Hydroxy- 6 -Dodecanone Oxime.
K. Akiba, T. Takahashi and T. Kanno : Bull. Chem. Soc. Jpn. **57** (1984) 2618.
- 139- f アルミニウム合金の誘導放射能およびそれに及ぼす微量成分の影響
今野収, 藤川辰一郎, 榎本和義, 八木益男 : 軽金属 **34** (1984) 22.
- 140- f Preparation of High Purity Chromium.
M. Isshiki, K. Arakawa and K. Igaki : J. Less-Common Met. **96** (1984) 157.
- 141- c Stable-Isotope Dilution Activation Analysis for Special Samples in which the Self-Shielding Effect is Negligible. Determination of Strontium in Biological Materials by Means of Photon Activation.
M. Yagi and K. Masumoto : J. Radioanal. Nucl. Chem. **A90** (1985) 91.
- 142- c Determination of Trace Elements in Boron by Instrumental Photon Activation Analysis.
T. Kato, K. Nagase and H. Yokobayashi : Anal. Sci. **1** (1985) 307.
- 143- c Petrology and Geochemistry of the Nyamuragira Volcano, Zaire.
K. Aoki, T. Yoshida, K. Yusa and Y. Nakamura : J. Volcanology & Geother-

- mal Res. **25** (1985) 1.
- 144- c 森吉火山の岩石学-カルデラ形成後に主として活動した混合マグマ
中川光弘, 青木謙一郎, 岩鋳 **80** (1985) 136.
- 145- c 山形県温海町住吉崎アルカリドレライト岩床の岩石学的研究
徐紅 : 岩鋳 **80** (1985) 206.
- 146- c 紀伊半島中部, 太峯地域の中新世 I タイプおよび S タイプ花こう岩質岩の微量化学組成
村田守, 吉田武義 : 岩鋳 **80** (1985) 227.
- 147- d Evaluation of the Liquid-Liquid Partition Coefficient of Bis (Acetylacetonato) Copper (II) : Contribution of Specific Solute-Solvent Interaction.
H. Imura and N. Suzuki : J. Radioanal. Nucl. Chem. **A88** (1985) 63.
- 148- d Solvent Effect on the Liquid-Liquid Partition Coefficients of Copper (II) Chelates with Some β -Diketones.
H. Imura and N. Suzuki : Talanta **32** (1985) 785.
- 149- d Solvent Effect on the Synergic Extraction of Thulium (III) with Acetylacetone and 1, 10-Phenanthroline.
S. Nakamura, H. Imura and N. Suzuki : Inorg. Chim. Acta **109** (1985) 157.
- 150- d Synergic Extraction of Thulium (III) with Thenoyltrifluoroacetone and Natural Unidentate and Bidentate Heterocyclic Amines.
S. Nakamura, H. Imura and N. Suzuki : Inorg. Chim. Acta **110** (1985) 101.
- 151- e A Rapid Preparation Method for ^{39}Cl -Labelled Alkyl Chlorides.
M. Yagi, Y. Murano, G. Izawa and K. Masumoto : Int. J. Appl. Radiat. Isot. **36** (1985) 69.
- 152- d Extraction of Uranium by a Supported Liquid Membrane Containing Mobile Carrier.
K. Akiba and H. Hashimoto : Talanta **32** (1985) 824.
- 153- f Preparation of High Purity Cobalt.
M. Isshiki, Y. Fukuda and K. Igaki : J. Less-Common Met. **105** (1985) 211.
- 154- f Ion-Exchange Properties of Zeolites and Their Application to Processing of High-Level Liquid Waste.

- T. Kanno and H. Mimura : *Proc. Int. Symp. Inorganic Ion-exchangers and Absorbents for Chemical Processing in the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, 1985* (IAEA TECDOC-337, Vienna) p. 237.
- 155- f Distribution and Fixation of Cesium and Strontium in Zeolite A and Chabazite.
H. Mimura and T. Kanno : *J. Nucl. Sci. Technol.* **22** (1985) 284.
- 156- c 紀伊半島中部, 太峯地域の中新世 I タイプおよび S タイプ花崗岩質の岩石学.
村田 守 : *岩鉱* **79** (1984) 351.
- 157- d Ion Exchange Properties of Zeolites and Application to Processing of High-Level Liquid Waste.
T. Kanno and H. Mimura : *Proc. Int. Symp. Inorganic Ion-exchangers and Absorbent for Chemical Processing in the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, 1984* (IAEA TC-518/20, Vienna, 1984).
- 158- b Mechanism of Recoil Implantation Reactions of Technetium and Ruthenium in Metal Acetylacetonates.
T. Sekine and K. Yoshihara : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **105** (1986) 229.
- 159- b Application of Nuclear Recoil to Radioisotope Enrichment of Copper-64 : Feasibility of Simplified Chemical Processing of Water-Soluble Copper Phthalocyanine.
T. Sekine, K. Kimura and K. Yoshihara : *J. Nucl. Sci. Technol.* **23** (1986) 1064.
- 160- d Chemical Behaviour of ^7Be Recoils Formed through $^{12}\text{C}(\gamma, n\alpha)^7\text{Be}$ Reaction in Several Phthalocyanine Complexes.
Y. Oki, H. Shoji, M. Aihara and N. Ikeda : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **106** (1986) 243.
- 161- c Substoichiometric Determination of Uranium in Phosphate Rock.
N. Suzuki, K. Hanzawa and H. Imura : *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **97** (1986) 81.
- 162- c Synthetic Multi-Element Reference Material with Pseudo-Biological Matrix Composition.
N. Suzuki, Y. Iwata and H. Imura : *Anal. Sci.* **2** (1986) 335.
- 163- c Solvent Effect on the Liquid-Liquid Partition Coefficients of Dimethyldithiocar-

- bamic Acid and its Copper (II) Chelate.
- H. Imura, S. Matsumora and N. Suzuki : Bull. Chem. Soc. Jpn. **59** (1986) 621.
- 164- c Liquid-Liquid Extraction Behavior of Arsenic (III), Arsenic (V), Methylarsonate and Dimethylarsinate in Various Systems.
- N. Suzuki, K. Satoh, H. Shoji and H. Imura : Anal. Chim. Acta. **185** (1986) 239.
- 165- f An Automatic Gamma-Ray Spectrometer Equipped with a Micro-Robot for Sample Changing.
- M. Yagi, K. Masumoto and M. Muto : J. Radioanal. Nucl. Chem. **98** (1986) 31.
- 166- c Simultaneous Determination of Ca, Rb, Sr and Ce in Environmental Materials by Phpton Activation Analysis using the Stable Isotope Dilution Method.
- M. Yagi and K. Masumoto : J. Radioanal. Nucl. Chem. **99** (1986) 287.
- 167- c Highly Accurate and Precise Multielement Determinaiton of Environmental Samples by Means of Photon Activation using the Internal Standard Method.
- K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **100** (1986) 287.
- 168- d Uranium (III) Transport through Supported Liquid Membrane with Trioctylphosphine Oxide.
- K. Akiba and H. Hashimoto : Anal. Sci. **2** (1986) 541.
- 169- d Segregation Coefficients of Ag, Co, I and In in CdTe.
- M. Isshiki, M. Sato and K. Masumoto : J. Crystal. Growth **78** (1986) 58.
- 170- d Impurity Diffusion of Manganise in Aluminum.
- S. Fujikawa and K. Hirano : Materials Science Forum **13/14** (1986) 539.
- 171- c 日本列島における含磷酸塩岩の存在—北上山地ペルム系登米統頁岩中の例。
- 蟹沢聰史, 永広昌之, 吉田武義 : 地球 **3** (1986) 53.
- 172- c 鬱陵島火山岩の結晶分化作用。
- 金 允圭 : 岩鉱 **81** (1986) 165.
- 173- c 鳥海火山の岩石学 (その3) —微量元素組成および岩石成因論。
- 林信太郎 : 岩鉱 **81** (1986) 370.
- 174- c Photon-Activation Analysis of Standard Rocks using an Automatic γ -ray

counting System with a Micro-Robot.

T. Yoshida, K. Masumoto and K. Aoki : J. Jpn. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol. **81** (1986) 406.

175- c 青森-恐山山列：東北日本孤火山フロント。

中川光弘, 霜鳥 洋, 吉田武義 : 岩鉱 **81** (1986) 471.

176- b Chemical Behavior of Technetium Atoms Recoil-Implanted in Metal Acetylacetonates.

T. Sekine and K. Yoshihara : J. Nucl. Sci. Tech. **24** (1987) 47.

177- b Recoil Implantation Reaction in Geometrical Isomers of Tris (Benzoylacetonato) Chromium (III).

T. Sekine and K. Yoshihara : J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. **118** (1987) 137.

178- c Instrumental Photon Activation Analysis of Environmental Materials Using the Internal Standard Method.

M. Yagi and K. Masumoto : J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles. **109** (1987) 273.

179- c Instrumental Photon Activation Analysis of Soil Samples Using the Internal Standard Method Coupled with the Standard Addition Method.

K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles. **116** (1987) 375.

180- c Selective Substoichiometry for Inorganic Arsenic (V) by Ion-Pair Extraction with Pyrogallol/Tetraphenylarsonium Chloride and Its Application in the Analysis of Seaweed.

N. Suzuki, F. Jitoh, H. Imura and Y. Kanda : Anal Chim. Acta. **193** (1987) 239.

181- d 長鎖8-キノリノール液体膜によるウランの濃縮。

秋葉健一, 大橋弘三郎 : 分析化学 **36** (1987) 707.

182- d Impurity Diffusion of Manganese in Aluminum.

S. Fujikawa and K. Hirano : Mater. Sci. Forum **13/14** (1987) 539.

183- d Diffusion of Gold in Copper over a Wide Range of Temperature.

S. Fujikawa, M. Werner, H. Mehrer and A. Seeger : Mater. Sci. Forum **15-**

- 18 (1987) 431.
- 184- c Revaluation of the Internal Standard Method Coupled with the Standard Addition Method Applied to Soil Samples by Means of Photon Activation.
K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **121** (1988) 131.
- 185- c Determination of Carbon in Copper by Photon Activation Analysis.
A. Yoshioka, K. Nomura, M. Takeya, K. Shimura, K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **122** (1988) 175.
- 186- c Determination of Several Trace Metals in Seaweed by Neutron Activation Analysis after Diethyldithiocarbamate Extraction and Polystyrene-foam Collection.
N. Suzuki, Y. Iwata and H. Imura : Int. J. Environ. Anal. Chem. **30** (1987) 289.
- 187- c Substoichiometric Separation and Determination of Trace Metals.
N. Suzuki : J. Radioanal. Nucl. Chem. **124** (1988) 197.
- 188- d Extraction of Uranium by Emulsion Liquid Membranes Containing β -Diketones and Tributyl Phosphate.
K. Akiba and J. Ohki : High Temp. Materials Processes **8** (1988) 21.
- 189- b Recoil Behaviour of Central Metal Atoms in Cobalt and Zinc Phthalocyanine Mixed Crystals.
Y. Oki, H. Shoji and N. Ikeda : J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. **126** (1988) 269.
- 190- c 東北日本弧, 第四世紀玄武岩組成の水平変化.
中川光弘, 霜鳥洋, 吉田武義 : 岩鉱 **83** (1988) 9.
- 191- c みかぶ緑色岩帯の岩石化学 —超苦鉄質岩類と苦鉄質火山岩との成因的關係—
大貫仁, 吉田武義, 花松俊一 : 地球 **10** (1988) 398.
- 192- c 北上山地の前期白亜紀火成活動の特徴.
蟹沢聰史・片田正人 : 地球科学 **42** (1988) 220.
- 193- d Tholeiitic and Calc-alkaline Magma Series at Adatara Volcano, Northeast Japan.
A. Fujinawa : Lithos. **22** (1988) 135.
- 194- c Solvent Extraction of Several Metal Ions with Mercaptotropone.
M. Yamashita and N. Suzuki : J. Radioanal. Nucl. Chem. (A) **133** (1989) 333.

- 195— c Substoichiometric Speciation for Inorganic Arsenic and Methylated Arsenic and Its Application to Samples of Marine Organisms.
F. Jitoh, H. Imura and N. Suzuki : *Anal. Chim. Acta* **228** (1990) 85.
- 196— b A New Detection Method of ^{99}Tc by Nuclear Excitation.
T. Sekine, K. Yoshihara, Zs. Nemeth, L. Lakosi and A. Veres : *J. Radioanal. Nucl. Chem. (A)* **130** (1989) 269.
- 197— b Specific Radiation and Recoil Energy Effects in Recoil Implantation Reaction of ^{51}Cr in Metal Acetylacetonates.
A. Miyakawa, H. Takeya, T. Sekine and K. Yoshida : *J. Radioanal. Nucl. Chem. (L)* **136** (1989) 151.
- 198— b Recoil Implantation Reaction in Tris (β -diketonato) -Metal (III) — Characteristic Feature for the Substitution Reaction of the Central Metal Atom by the Recoil Atom.
T. Sekine and K. Yoshida : *Proc. Int. Symp. Advanced Nuclear Energy Research — Near-Future Chemistry in Nuclear Energy Field, (Ibaraki, Japan, 1989)* p. 108.
- 199— b Measurement of $^{103\text{m}}\text{Rh}$ Produced by the $^{103}\text{Rh} (\gamma, \gamma') ^{103\text{m}}\text{Rh}$ Reaction with Liquid Scintillation Counting.
T. Sekine, K. Yoshihara, I. Pavilcsek, L. Lakosai and A. Veres : *J. Radioanal. Nucl. Chem. (L)* **137** (1989) 57.
- 200— b Energy Dependence of the Formation Yield of $^{51}\text{Cr}(\text{acac})_3$ in Recoil Implantation Using a Thin Film Technique.
A. Miyakawa, T. Sekine and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **18** (1989) 11.
- 201— b Recoil Implantation Reaction in Binary Mixtures of Catcher Complexes and in Mixed Ligand Catchers.
T. Sekine, M. Sano and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **48** (1989) 17.
- 202— c 北上山地, 折壁複合深成岩体の累帯構造.
氏家真澄 : *岩鉱* **84** (1989) 226.
- 203— c Genesis of the Extremely Low-K Tonalites from the Island Arc Volcanism.
S. Kanisawa and T. Yoshida : *Bull. Volcanol.* **51** (1989) 346.

- 204-c 東北本州弧第四紀火山岩類の研究。
吉田武義：地質学論集 **32** (1989) 353.
- 205-c 上部マントルかんらん岩中のクロムスピネルの主成分と微量成分について。
青木謙一郎，吉田武義：岩鉱特別号 **4** (1989) 163.
- 206-c Petrology and Geochemistry of Pleistocene Dacitic and Rhyolitic Pyroclastic Flows from Southern Part of Northeast Honshu, Japan.
K. Aoki, T. Yoshida and J. Y. Zhe : J. Min. Pet. Econ. Geol. **84** (1989) 1.
- 207-c 日本海東緑久六島の鮮新世アルカリ玄武岩。
福留高明，吉田武義，長尾敬介，板谷徹丸，田上誠二：岩鉱 **85** (1990) 10.
- 208-d ゼオライトによる放射性セシウムとストロンチウムの除去。
三村均，山岸力，秋葉健一：日本化学会誌 **1989** (1989) 621.
- 209-b A New Approach of the Study of Normalized Appearance Energy of Hot Atom Reaction Product in Optical Isomers of Tris (Acetylacetonato) Ruthenium.
I. Kaneko, T. Sekine, K. Yoshihara : J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. **144** (1990) 89.
- 210-b Effective Hot Reaction Zone, Caging Energy and Normalized Appearance Energy in Ruthenium Complexes.
H. Matsue, I. Kaneko, T. Sekine and Y. Yoshihara : *ibid.* **145** (1990) 271.
- 211-c Analytical Sensitivities for Thirty-six Elements in Cellulose Matrix by Means of High-Energy Photon Activation and Low-Energy Photon Detection.
T. Kato, T. Sato and K. Mori : Anal. Sci. **6** (1990) 103.
- 212-c Determination of Arsenic and Other Elemental Abundances in Marine Macro-Algae by Photon Activation Analysis.
N. Suzuki and Y. Iwata : Appl. Organomet. Chem. **4** (1990) 287.
- 213-c Selective Preconcentration of Rare Earth Elements by Substoichiometric Precipitation to the Neutron Activation Analysis of Biological Material.
Y. Iwata, H. Imura and N. Suzuki : Anal. chem. Acta **239** (1990) 115.
- 214-c 活動的縁辺部における白亜紀火成活動の下部構造—微量元素からみた北上山地白亜紀深成岩の特徴—。
蟹沢聰史，吉田武義：地球 **12** (1990) 407.

- 215- c 東北地方を覆う古代の珪長質テフラ ‘十和田一大場浮石’ の同定。
山田一郎, 井加克弘 : 第 4 紀研究 **29** (1990) 121.
- 216- c 東伊豆単成火山群の岩石学
宮島宏 : 岩鉱 **85** (1990) 315.
- 217- c Solvent Extraction of the Hexaaquarhodium (III) Ion from Halogenated Carboxylate Solutions with Trioctylphosphine Oxide.
N. Imura, H. Takahashi and N. Suzuki : Bull. Chem. Soc. Jpn. **64** (1991) 882.
- 218- c Determination of Several Trace Metals in Biological Materials by PIXE Analysis after Solvent Extraction and Polystyrene-film Collection.
Y. Iwata, T. Korenaga and N. Suzuki : Int. J. PIXE **3** (1991) 271.
- 219- c ホスホン酸エステル含浸型液体膜によるウラン (VI) の輸送
中村重人, 大橋伸一, 秋葉健一 : 分析化学 **40** (1991) 829.
- 220- c A Flexible Automation System for Various Radioactivity Measurement Using Small Robots and Local Area Network.
K. Masumoto, S. Ushino, M. Mutoh and M. Yagi : Anal. Sci. **7** suppl. (1991) 743.
- 221- c Instrumental Photon Activation Analysis of Coal Fly Ashes Using the Internal Standard Method Coupled with the Standard Addition Method.
K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **152** (1991) 55.
- 222- c Determination of Carbon Impurity in Gallium Arsenide Crystals by Photon Activation Analysis.
A. Yoshioka, K. Nomura, O. Kawakami, K. Shimura, K. Masumoto and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **148** (1991) 201.
- 223- b Comparison of Implantation Reactions with Hot Atom Reactions in Geometrical and Optical Isomers of Metal β -Diketonates.
T. Sekine, I. Kaneko and K. Yoshihara : Radiochim. Acta **55** (1991) 71.
- 224- b Parent Type Chemical Species Formed by Recoil Implantation Reaction in Tris (β -diketonato) metal (III).
T. Sekine and K. Yoshihara : Radiochim. Acta **55** (1991) 65.
- 225- a Detection Limit of Technetium in $^{99}\text{Tc}(\gamma, \gamma')$ ^{99}Tc Reaction Analysis in the

Presence of Molybdenum.

M. Yagi, T. Sekine and K. Yoshihara : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **155** (1991) 435.

226— a Integral Cross Section of the $^{99}\text{Tc}(\gamma, \gamma')$ ^{99}Tc Reaction in the 15–50 MeV Energy Region.

T. Sekine, Y. Yoshihara, L. Lakosi, Zs. Nemeth and A. Veres : *Appl. Radiat. Isot.* **42** (1991) 149.

227— a ^{103m}Rh Production by Inelastic Gamma Scattering in the Giant Dipole Resonance Region.

J. Safar, H. Kaji, K. Yoshihara, L. Lakosi and A. Veres : *Phys. Rev.* **C44** (1991) 1086.

228— d Analysis of Impurity Diffusion in Aluminum Based on Recent Works.

S. Fujikawa : *Proc. Int. Conf. Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals. 1991*, p. 959.

229— c Enhancement Effect of 3,5-Dichlorophenol on the Solvent Extraction of Copper (II) and Zinc (II) with Acetylacetone and Trifluoroacetylacetone.

S. Katsuta and N. Suzuki : *Talanta* **39** (1992) 849.

230— d Breakthrough Properties of Cesium in Columns of Ferrierites.

H. Mimura, F. Tachibana and K. Akiba : *J. Nucl. Sci. Technol.* **29** (1992) 78.

231— d マグネシウムにおける拡散.

藤川辰一郎 : *軽金属学会誌* **42** (1992) 822.

232— d マグネシウムにおける Mn の拡散.

藤川辰一郎 : *軽金属学会誌* **42** (1992) 826.

233— d Production of Microsectioning Apparatus for Diffusion Study and Preliminary Measurement of Self-Diffusivity of Copper in Low Temperature Range.

S. Fujikawa and K. Itagaki : *Proc. Int. Conf. Diffusion in Materials, Dimat-92, Sep. 7-11, 1992, Kyoto.*

234— d Analysis of Interdiffusion Experiments for Al/Mn Artificial Multilayered Films and Impurity-Diffusion of Mn in Aluminum.

S. Fujikawa and Y. Nishihara : *Proc. Int. Conf. Diffusion in Materials, Dimat-*

92, Sep. 7-11, 1992, Kyoto.

- 235- c Low-Pressure Fractional Crystallization Origin of the Tholeiitic Basalts of the Deccan Plateau, India.
K. Aoki, T. Yoshida, S. Aramaki and H. Kurasawa : J. Min. Petr. Econ. Geol. **87** (1992) 375.
- 236- c Island Arc Tholeiite by Partial Melting from an Undepleted or Slightly Depleted Primitive Mantle : Evidence from Trace Elements and Nd-Sr Isotopes of Frontal Arc Magmas from Notheast Japan.
S. Togashi, T. Tanaka, T. Yoshida, K. Ishikawa, A. Fujikawa and H. Kurasawa : Geochem. J. **26** (1992) 261.
- 237- d Adsorption Behavior of Cesium and Strontium on Synthetic Zeolite P.
H. Mimura and K. Akiba : J. Nucl. Sci. Technol. **30** (1993) 436.
- 238- d Removal of Heat-Generating Nuclides from High-Level Liquid Wastes through Mixed Zeolite Columns.
H. Mimura, K. Akiba and H. Igarashi : J. Nucl. Sci. Technol. **30** (1993) 239.
- 239- d Production of Microsectioning Apparatus for Diffusion Study and Preliminary Measurement of Self-Diffusivity of Copper in Low Temperature Range.
S. Fujikawa and K. Itagaki : Defect and Diffusion Forum **95-98** (1993) 741.
- 240- d Analysis of Interdiffusion Experiments in Al/Mn Artificial Multilayered Films and Impurity Diffusion of Manganese in Aluminum.
S. Fujikawa and Y. Nishida : Defect and Diffusion Forum **95-98** (1993) 617.
- 241- b A Comparison of the Hot Atom Reaction with the Implantation Reaction in Metalocene and Its Cyclodextrin Inclusion Compounds.
H. Masue, I. Yamaguchi, T. Sekine and K. Yoshihara : Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B91** (1994) 97.
- 242- b Recent Studies on Appearance Energy and Hot Reaction Zone in Solid-State Reactions in Metalloenes and Their β -Cyclodextrin inclusion Compounds.
K. Yoshihara, T. Sekine and H. Masue : Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B91** (1994) 103.
- 243- f An Automatic Measurement System for Radiochemical Study Using Small

Robots and PC-LAN.

K. Masumoto, S-I. Ushino, M. Mutoh, M. Yagi and T. Yoshida : *Laboratory Robotics and Automation* **6** (1994) 21.

244— d Extraction Behavior of Uranyl Complexes with Benzoyl-isooctanoylmethane.

K. Akiba, J. Horie and H. Hashimoto : *Solvent Extraction Research and Development, Jpn.* **2** (1995) 138.

245— d Chromatographic Separation of Strontium and Cesium with Mixed Zeolite Column.

H. Mimura, T. Kobayashi and K. Akiba : *J. Nucl. Sci. Technol.* **32** (1995) 60.

246— b Energy Dependence of 'Molecular Rocket Reaction' in Modified Metalocene-Cyclodextrin Inclusion Compound and Comparison with Those in Other Systems.

H. Matsue, I. Yamaguchi, T. Sekine and K. Yoshihara : *Radiochim. Acta* **68** (1995) 163.

247— c Shock-induced Chemical Processes and 'Molecular Rocket Reaction' in Metalloenes and Their Cyclodextrin Inclusion Compounds.

H. Matsue, I. Yamaguchi, T. Sekine and K. Yoshihara : *Shock Waves* **4** (1995) 267.

248— c Photon Activation Analysis of Trace Metals in the Livers and Spleens of Pigs.

M. Fukushima : *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles* **195** (1995) 145.

249— c A Mechanism for Na Incorporation in Garnet : An Example from Garnet in Orthogneiss from the Su-Lu Terrane, Eastern China.

M. Enami, B. Cong, T. Yoshida and I. Kawabe : *American Mineralogist* **80** (1995) 475.

250— c 新生代東北本州弧の地殻・マントル構造とマグマ起源物質の変遷.

吉田武義, 大口健志, 阿部智彦 : *地質学論集* **44** (1995) 263.

251— c A Dedicated NAA Method to Determine the Neutron Spectrum Monitor Elements Co, Au and Lu with High Accuracy in Alloyed Wires and Foils.

F. De Corte, K. Masumoto A. De Wispelaere and F. Bellemans : *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **192** (1995) 91.

252— b Observation of Radioactive Fullerene Families Labeled with ¹⁴C.

- T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki, K. Kobayashi and K. Kikuchi : J. Am. Chem. Soc. **117** (1995) 12869.
- 253— d Production of Radioactive Fullerene Families Using Accelerators.
T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki and K. Kikuchi : Material Science and Engineering A, **MSA217** (1996) 38.
- 254— d Insertion of Be Atoms in C₆₀ Fullerene Cage : Be @ C₆₀.
T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Ohno, Y. Maruyama, Y. Kawazoe, K. Sueki and K. Kikuchi : Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 3522.
- 255— c Determination of Fluorine in Standard Rocks by Pphoton Activation Analysis.
H. Sakurai, M. Fukuda, Y. Hayashibe, Y. Sayama, K. Masumoto and T. Ohtsuki : J. Radio. Anal. Nucl. Chem. **217** (1997) 267.

V 加速器・測定器

1. Detector System for the Analysis of Scattered Electrons in Tohoku University 300-MeV Linac.
M. Kimura, Y. Torizuka, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, M. Oyamada, K. Nakahara, K. Itoh, K. Sugiyama, M. Gotoh, K. Miyashita and K. Kurahashi : Nucl. Instrum. & Methods **95** (1971) 403.
2. Positron Acceleration Using a 30 MeV Electron Linear Accelerator.
T. Saito, Y. Nakada and A. Nakada : Jpn. J. Appl. Phys. **11** (1972) 396.
3. Performance of an Energy Compressing System for the Tohoku 300 MeV Linac.
M. Sugawara, T. Ichinohe, S. Urasawa, M. Oyamada, T. Kubota, A. Kurihara, O. Konno, Y. Shibazaki, T. Terasawa, K. Nakahara, S. Enomoto, M. Muto, K. Shoda and Y. Torizuka : Nucl. Instrum. & Methods **153** (1978) 343.
4. The Next Accelerator at Sendai.
M. Sugawara : *Proc. Int. Conf. Nuclear Physics with Electromagnetic Interactions*, ed. J. Ehlers, *Lecture Notes in Physics 108*, p. 198.
5. New Project of 1.5 MeV Electron Linac and Pulse Stretcher.
M. Oyamada : *Proc. Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, Atami, 1980* p. 416.
6. 150 MeV Pulse Stretcher at Sendai.
T. Tamae : *Proc. Con. New Horizons in Electromagnetic Physics, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1982*, p. 508.
7. Experience with a 150 MeV Pulse Stretcher Ring SSTR.
M. Sugawara : *Workshop on the Use of Electron Rings for Nuclear Physics Reserch in the Intermediate Energy Region, Lund, 1982*, ed. J-0. Adler and B. Schrøer. p. 52.
8. 150-MeV Pulse Stretcher of Tohoku University.
T. Tamae, M. Sugawara, O. Konno, T. Sasanuma, T. Tanaka, M. Muto, K. Yoshida, M. Hirooka, Y. Shibazaki, K. Yamada, T. Terasawa, S. Urasawa, T. Ichinohe, S. Takahashi, H. Miyase, Y. Kawazoe, S. Yamamoto and Y. Torizuka : IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-30** (1983) 3235.

9. The Next Electron Accelerator Plan at Tohoku.
Y. Torizuka : *Proc. Second China-Japan Joint Symp. on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, Lanzhou, 1983*, p. 469.
10. Pulse Stretcher of Tohoku University.
T. Tamae : *Proc. INS Kikuchi Winter-School on Accelerators for Nuclear Physics, 1984*, Genshikaku Kenkyu **28** No. 3, p. 355.
11. The Tohoku Proposal for a CW Electron Facility.
M. Sugawara : *Proc. 1983 INS Int. Symp. Energy Photo-Nuclear Reactions and Related Topics, Tokyo*, eds. S. Homma and F. Sakata, (INS, Univ. of Tokyo, Tokyo, 1984).
12. The 150-MeV Photon Tagging System at Sendai.
T. Terasawa, K. Mori, Y. Fujii, T. Suda, I. Nomura, O. Konno, T. Ichinohe, Y. Torizuka, K. Maeda, P. D. Harty, G. J. O'keefe and M. N. Thompson : *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res.* **A248** (1986) 429.
13. パルス・ストレッチャーと同時計数実験.
玉江忠明 : 日本物理学会誌 **42** (1987) 167.
14. SSTR-The 150 MeV Pulse Stretcher of Tohoku University.
T. Tamae, M. Sugawara, Y. Yoshida, O. Konno, T. Sasamura, M. Muto, Y. Shibazaki, T. Tanaka, M. Hirooka, K. Yamada, T. Terasawa, S. Urasawa, T. Ichinohe, S. Takahashi, H. Miyase, Y. Kawazoe, S. Yamamoto and Y. Torizuka : *Nucl. Instrum. and Meth.* **A264** (1988) 173.
15. 東北大学共用リング計画とその放射光利用.
新村信雄 : 加速器科学 **2** (1988) 13.
16. Observation of Coherent Synchrotron Radiation.
T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, O. Konno, A. Kagaya, R. Kato, T. Kamiyama, Y. Torizuka, T. Nanba, Y. Kondo, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka and M. Ikezawa : *Phys. Rev. Lett.* **63** (1989) 1245.
17. A New Strong Radiation Source by an Electron Linear Accelerator — Coherent Synchrotron Radiation.
T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, R. Kato, Y. Shibata,

K. Ishi, T. Ohsaka, T. Takahashi, H. Mishiro, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nanba and Y. Torizuka : *Proc. 7th Symp. Accelerator Science Technology* (Osaka, 1989) p. 195.

18. Coherent Synchrotron Radiation.

T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, R. Kato, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, T. Takahashi, H. Mishiro, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nanba and Y. Torizuka : *Particle Accelerators* **33** (1990) 141.

19. Coherent Synchrotron Radiation by and Electron Linear Accelerator.

T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, R. Kato, Y. Torizuka, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, T. Takahashi, H. Mishiro, M. Ikezawa and Y. Kondo : *Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, Mito* (1990) p. 586.

20. An Extremely Strong Radiation Source in the Far Infrared to Submillimeter Wavelength Region by Coherent Synchrotron Radiation.

T. Nakazato and M. Ikezawa : *Science & Technology in Japan* **9** No. 33 (1990) 57.

21. A Coherent Synchrotron Radiation Source Using an S-band Linac.

M. Oyamada and Coherent Synchrotron Radiation Group : *Proc. 4th China-Japan Joint Symposium on Accelerator for Nuclear Science and Their Applications, Beijing, 1990*.

22. Coherent Synchrotron Radiation.

T. Nakazato and Coherent Synchrotron Radiation Group : *Proc. 4th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Collective Effects in Short Bunches, Tsukuba, Japan, (1990)* p. 171.

23. コヒーレント放射光 (最近の研究から)

池沢幹彦 : *日本物理学会誌* **45** (1990) 564.

24. Coherent Synchrotron Radiation at Submillimeter and Millimeter Wavelengths.

Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, H. Mishiro, T. Takahashi, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, R. Kato and Y. Torizuka : *Nucl. Instrum. and Meth.* **A301** (1991) 161.

25. Spectrum of Coherent Synchrotron Radiation in the Far-Infrared Region.
K. Ishi, Y. Shibata, T. Takahashi, H. Mishiro, T. Ohsaka, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nakazato, S. Urasawa, N. Niimura, R. Kato, Y. Shibasaki and M. Oyamada : *Pys. Rev. A* **43** (1991) 5597.
26. Observation of Interference between Coherent Synchrotron Radiation from Periodic Bunches.
Y. Shibata, T. Takahashi, K. Ishi, F. Arai, H. Mishiro, T. Ohsaka, M. Ikezawa, Y. Kondo, S. Urasawa, T. Nakazato, R. Kato, S. Niwano and M. Oyamada : *Phys. Rev. A* **43** (1991) R3445.
27. Outgassing Characteristics and Composition Analysis of Aluminum alloy Extrudate under Electron Beam Irradiation.
O. Konno and T. Ohi : *J. of Vacuum Sci. & Tech.* **A9** (1991) 3134.
28. Development of a Diagnostic System for Klystron Modulators Using a Neural Network.
M. Mutoh, T. Oonuma, Y. Shibasaki, I. Abe and K. Nakahara : *Proc. Int. Conf. Accelerator and Large Experimental Physics Control System, KEK, Tsukuba, 1991.* eds. C. O. Pak, S. Kurokawa and T. Katoh, p. 558.
29. The Tohoku University Stretcher-Storage Ring Project.
M. Sugawara : *Proc. 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, Saitama, 1991,* p. 112.
30. Coherent Synchrotron Radiation.
M. Oyamada, S. Urasawa, T. Nakazato, R. Kato, S. Niwano, M. Yoshioka, M. Ikezawa, T. Ohsaka, K. Ishi, Y. Shibata, T. Tsutaya, S. Kimura, T. Takahashi, H. Arai, T. Kanai and Y. Kondo : *ibid.* p. 272.
31. Stretcher-Booster Ring of the Proposed Facility in Tohoku University.
T. Tamae, T. Eguchi, T. Nakazato, R. Kato and O. Konno : *ibid.* p. 462.
32. Neutron Detection System for the $(e, e' n)$ Reaction.
S. Suzuki, T. Saito, K. Takahisa, C. Takakuwa, T. Tohei, T. Nakagawa, Y. Kobayashi and K. Abe : *Nucl. Instr. and Meth.* **A314** (1992) 547.
33. Coherent Transition Radiation at Submillimeter and Millimeter Wavelengths.

- T. Takahashi, Y. Shibata, F. Arai, K. Ishi, T. Ohsaka, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nakazato, S. Urasawa, R. Kato, S. Niwano and M. Oyamada : *Phys. Rev. E* **48** (1993) 4674.
34. Coherent Radiation at Submillimeter and Millimeter Wavelengths.
M. Oyamada, R. Kato, T. Nakazato, S. Urasawa, T. Yamakawa, M. Yoshioka, M. Ikezawa, K. Ishi, T. Kanai, Y. Shibata and T. Takahashi : *Proc. of the 1993 Particle Acc. Conf. Washington D. C., May, 17-20* (1993) p. 1614.
35. Suppression of Coherent Synchrotron Radiation in Conducting Boundaries.
R. Kato, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Urasawa, T. Yamakawa, M. Yoshioka, M. Ikezawa, K. Ishi, T. Kanai, Y. Shibata and T. Takahashi : *Proc. of the 1993 Particle Acc. Conf. Washington D. C., May, 17-20* (1993) p. 1617.
36. Wire Scanner Beam Size Monitor for ATF.
H. Hayano, M. Kikuchi, T. Naito, J. Urakawa, M. Yoshioka, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Urasawa and T. Yamakawa : *Proc. of the 9th Symposium on Acc. Sci. Technol, Tsukuba, Aug. 25-27* (1993) p. 354.
37. Design of Profile Monitor for ATF.
T. Naito, H. Hayano, M. Kikuchi, J. Urakawa, M. Yoshioka, M. Oyamada, S. Urasawa, T. Nakazato and T. Yamakawa : *Proc. of the 9th Symposium on Acc. Sci. Technol, Tsukuba, Aug. 25-27* (1993) p. 373.
38. Suppression and Enhancement of Coherent Synchrotron Radiation in Conducting Boundaries.
R. Kato, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Urasawa, T. Yamakawa, M. Yoshioka, M. Ikezawa, K. Ishi, T. Kanai, Y. Shibata and T. Takahashi : *Proc. of the 9th Symposium on Acc. Sci. Technol, Tsukuba, Aug. 25-27* (1993) p. 419.
39. The Tohoku University Stretcher-Booster Ring.
M. Oyamada and Working Group : *Proc. of the 9th Symposium on Acc. Sci. Technol, Tsukuba, Aug. 25-27* (1993) p. 486.
40. Resonance Effects of Transition Radiation Emitted from Thin-Foil Stacks.
T. Tanaka, T. Awata, A. Itoh, N. Imanishi, T. Yamakawa, M. Oyamada, S. Urasawa and T. Nakazato : *Nucl. Instr. and Meth.* **B93** (1994) 21.

41. Coherent Transition Radiation in the Far-Infrared Region.
Y. Shibata, K. Ishi, T. Takahashi, T. Kanai, F. Arai, S. Kimura, T. Ohsaka, M. Yoshioka, Y. Kondo, R. Kato, S. Urasawa, T. Nakazato, S. Niwano, M. Yoshioka and M. Oyamada : *Phys. Rev.* **E49** (1994) 785.
42. Cherenkov Radiation from a Finite Trajectory of Electrons.
T. Takahashi, T. Kanai, Y. Shibata, K. Ishi, M. Ikezawa, T. Nakazato, K. Kobayashi, S. Urasawa, T. Yamakawa, K. Takami, T. Matsuyama, K. Kobayashi and Y. Fujita : *Phys. Rev.* **E50** (1994) 4041.
43. Outgassing Characteristics and Surface Analysis of Pure Aluminum Plates under Electron-Beam Irradiation.
T. Ohi and O. Konno : *J. Vac. Sci. Technol. A*, **12** (1994) 3186.
44. An Electron-beam Transport System for Parasitic Experiments.
T. Saito, T. Terasawa, O. Konno, S. Ito, H. Itoh, M. Oikawa, Y. Suga, M. Mutoh, T. Tamae, M. Susawara and D. Sims : *Nucl. Instr. and Math. Phys. Res.* **A362** (1995) 224.
45. Observation of Coherent Diffraction Radiation from Bunched Electrons Passing through a Circular Aperture in the Millimeter and Submillimeter-Wavelength Regions.
Y. Shibata, S. Hasebe, K. Ishi, T. Takahashi, T. Ohsaka, M. Ikezawa, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Urasawa, T. Yamakawa and Y. Kondo : *Phys. Rev.* **E52** (1995) 6787.
46. A New Approach to Control System for Medium-Scale Accelerators.
M. Mutoh, Y. Shibasaki and I. Abe : *Proc. Int. Conf. Accelerator and Large Experimental Physics Control System, Chicago, 1995*. eds. M. C. Crowley-Milling, P. Lucas and P. Schoessow, p926.
47. A Large-Volume Liquid-Scintillator Neutron Detector.
S. Ito, K. Maeda, T. Fukuda, O. Konno, T. Suda, M. Takeya and T. Terasawa : *Nuc. Instr. and Meth.* **A354** (1995) 475.
48. A New Type of Solid-State Detector for Ultra-Cold Neutrons.
T. Kitagaki, O. Konno and M. Higuchi : *Proc. Int. Symp. on Advance in Neu-*

tron Optics and Related Facilities, KUR, Mar. 1996.

49. The Tohoku University Stretcher-Booster Ring and Storage Ring Project.
M. Oyamada : *Proc. IV China-Japan Joint Symp. Accelerators for Nuclear Science and Their Applications. Chengdu, China, 1996.* eds. Sun Guanqing and Li Zhengda (Sichuan Union Univ. 1996) p. 78.
50. Data Base Driven Accelerator Control Using PCs.
I. Abe and M. Mutoh : *Proc. PCs and Particle Accelerator Controls, Hamburg, Desy, 1996* (to be published).
51. A Compact Control System with PCs and PLCs.
M. Mutoh, M. Nanao, Y. Shibasaki and I. Abe : *Int. Workshop on Controls for Small and Medium-Scale Accelerators, KEK, Tsukuba, 1996* (to be published).

VI 他研究機関での研究

1. C-Band Superconducting Cavity Reserch at KEK.
T. Furuya, K. Hosoyama, T. Kato, Y. Kojima and O. Konno : *Linear Accelerator Conference*, (1979)
2. Identification of the $T=1, 6^-$ stretched State in ^{40}Ca by Inelastic Proton and Deuteron Scattering.
T. Saito, Y. Hozumi, S. Suzuki, T. Tohei, T. Nakagawa, A. Sato, Y. Kobayashi, M. Fujiwara and Y. Fujita : *Phys. Rev. C* **40** (1989) R1108.
3. New Concept for Radiation Absobers in TRISTAN Accumlation Ring (TAR).
T. Momose, O. Konno, H. Hirayama and H. Ishimaru : *2nd European Accelerator Confernce, Acropolis* (1990) p. 12.
4. A New Type of Liquid ^3He Target for Photonuclear Reaction Studies.
S. Kato, K. Kobayashi, K. Maruyama, H. Okuno, O. Konno, T. Suda, T. Maki, H. Asami and T. Koizumi : *Nucl. Inst. and Methods*. **A307**, (1991) 213.
5. Excitation Energy and Spin Dependence of the Giant Dipole Resonance at Finite Temperature.
J. Kasagi, K. Furutaka, T. Murakami, A. Yajima, M. Ohshima, S. Niya, H. Tominaga, K. Yoshida, H. Hama, K. Ieki, W. Galster, T. Kubo, M. Ishihara and A. Galonsky : *Nucl. Phys.* **A538** (1992) 585c.
6. Inversion of Collective Matter Flow in Nucleus-Nucleus Collisions, Measured with a 4π Charged Particle Array.
J. Peter, J. P. Sullivan, G. Bizard, W. Q. Shen, R. Brou, D. Cussol, M. Louvel, J. P. Party, R. Regimbart, J.C. Steckmeyer, B. Tamain, E. Crema, H. Doubre, K. Hagal, G. M. Jin, A. Peghaire, F. Saint-Laurent, Y. Cassagnou, R. Legrain, C. Lebrun, E. Rosato, R. MacGrath, S. C. Jeong, S. M. Lee, Y. Nagashima, T. Nakagawa, M. Ogiwara, J. Kasagi and T. Motobayashi : *Nucl. Phys.* **A538** (1992) 75c.
7. Neutron Emission for the Fusion of $^{40}\text{Ar}+\text{Ni}$, ^{92}Mo , ^{122}Sn Reactions at $E/A=26$ MeV.
K. Yoshida, J. Kasagi, H. Hama, M. Sakurai, M. Kodama, K. Furutaka, K. Ieki, W. Galster, T. Kubo, M. Ishihara and A. Galonsky : *Phys. Rev.* **C46**

- (1992) 961.
8. ${}^7\text{Li}(\alpha, 2\alpha){}^3\text{H}$ Reaction from 77 to 119 MeV.
R. E. Warner, A. Okihana, M. Fujiwara, N. Matsuoka, S. Kakigi, S. Hayashi, K. Fukunaga, J. Kasagi and M. Tosaki : Phys. Rev. **C45** (1992) 2328.
 9. Energy Dependence of the ${}^6\text{Li}(\alpha, 2\alpha)\text{pn}$ Reaction from 77 to 119 MeV.
R. E. Warner, A. Okihana, M. Fujiwara, N. Matsuoka, S. Hayashi, K. Fukunaga, J. Kasagi, M. Tosaki and M. B. Greenfield, Phys. Rev. **C46** (1992) 616.
 10. Spectroscopic Study of Oxygen and Fluorine Isotopes with the $(\alpha, {}^3\text{He})$ and (α, t) Reactions on ${}^{16,17,18}\text{O}$.
M. Yasue, T. Hasegawa, S. I. Hayakawa, K. Ieki, J. Kasagi, S. Kubono, T. Murakami, N. Nishimura, K. Ogawa, H. Ohnuma, R. J. Peterson, H. Shimizu, M. H. Tanaka and H. Toyokawa : Phys. Rev. **C45** (1992) 1242.
 11. Quasifree Scattering in the ${}^6\text{Li}(\alpha, 2\alpha){}^2\text{H}$ Reaction at E_α between 77 and 119 MeV.
A. Okihana, T. Konishi, R. E. Warner, D. Francis, M. Fujiwara, N. Matsuoka, K. Fukunaga, S. Kakigi, T. Hayashi, J. Kasagi, N. Koori, M. Tosaki and M. Greenfield : Nucl. Phys. **A549** (1992) 1.
 12. Gamma-Ray Emission from Hot Nuclei.
J. Kasagi : *Proc. of the Tours Symposium on Nuclear Physics, Tours, France*, eds. M. Ohta and B. Remand (World Scientific Pub., 1992) p. 49.
 13. Charged Particle Emission in Fission Process.
H. Ikezoe, N. Shikazono, Y. Nagame, T. Ohtsuki, Y. Sugiyama, Y. Tomita, K. Ideno, I. Kanno, H.J. Kim, B.J. Qi and A. Iwamoto : Nucl. Phys. **A538** (1992) 299C.
 14. Gamma Rays of Short-lived Ruthenium Nuclides Produced in the Spontaneous Fission of ${}^{252}\text{Cf}$.
N. Shinohara, S. Ichikawa, S. Baba, K. Tsukada, T. Ohtsuki and J. Alstad : Radiochim. Acta **56**, (1992) 127.
 15. Charged Particle Multiplicities in Heavy-Ion Induced Fission.
H. Ikezoe, N. Shikazono, Y. Nagame, Y. Sugiyama, Y. Tomita, K. Ideno,

- I. Nishinaka, B.J.Qi and H.J. Kim : *Phys. Rev. C* **46** (1992) 1922.
16. Binary Scission Configuration in Actinide Fission.
T. Ohtsuki, H. Ikezoe, Y. Nagame, K. Tsukada and H. Nakahara : *Proc. Int. Workshop "Dynamical Aspects of Nuclear Fission", June 17-21, Smolenice, Castle (SCFR), Institute of Physics, SASc*, ed. J. Kristiak, (1992)p.180.
17. Giant Dipole Resonances in Hot Nuclei.
J. Kasagi and K. Yoshida : *Proc. of the 6th Franco-Japanese Colloquium "Nuclear Structure and Interdisciplinary Topics", Saint-Malo, France*, eds. N. Alamanos, S. Fortier and F. Dykstra (Sacle, 1993) p. 81.
18. Observation of High Energy Protons Emitted in the $TiD_x + d$ Reaction at $E_d = 150$ keV and Anomalous Concentration of 3He .
J. Kasagi, K. Ishii, M. Hiraga and K. Yoshihara : *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Cold Fusion, Nagaya, Japan*, ed. by H. Ikegami (Universal Academy Press Inc. , 1993) p. 209.
19. Giant Dipole Resonances in Hot Nuclei.
J. Kasagi and K. Yoshida : *Proc. of First Joint Italian-Japanese Meeting on "Perspectives in Heavy Ion Physics"*, eds. M. Di Toro and E. Migecco (Nouvo Cim. Conf. Proc. Vol. 38, 1993) p. 179.
20. Simultaneous Measurement of 3He (γ , p π^+) Yields and Model Implications.
T. Emura, S. Endo, G.M. Huber, H. Itho, S. Kato, O. Konno, B. Lasiuk, G. J. Lolos, K. Maeda, T. Maruyama, H. Miyamoto, K. Niki, C. Rangacharyulu, A. Sasaki, T. Suda, Y. Sumi, Y. Wada and H. Yamazaki : *Phys. Lett.* **B306** (1993) 6.
21. Performance of Phoswich Detector Composed of Thin Plastic and Thick BaF_2 Scintillators.
Y. Futami, T. Mizota, Y. H. Pu, Y. Honjo, K. Yuasa-Nakagawa, S.M. Lee, K. Furutaka, T. Murakami, J. Kasagi, K. Yoshida and T. Nakagawa : *Nucl. Instr. and Meth.* **A326** (1993) 513.
22. Neutron Production in Heavy Ion Reactions at 35 and 50 MeV/nucleon.
H. R. Schelin, A. Galonsky, C.K. Gelbke, H. Hama, L. Heilbronn,

- D. Krofcheck, W. G. Lynch, D. Sackett, M. B. Tsang, X. Yang, F. Deak, A. Horvath, A. Kiss, Z. Serea, J. Kasagi and T. Murakami : Nucl. Sci. and Eng. **113** (1993) 184.
23. Components of Collective Flow and Azimuthal Distributions in $^{40}\text{Ar}+^{27}\text{Al}$ and $^{40}\text{Ar}+^{58}\text{Ni}$ Collisions below 85 MeV/u.
W.Q. Shen, J. Peter, G. Bizard, R. Brou, D. Cussol, M. Louvel, J.P. Patry, R. Regimbart, J.C. Steckmeyer, J.P. Sullivan, B. Tamain, E. Crema, H. Doubre, K. Hagel, G.M. Jin, A. Peghair, F. Saint-Laurent, Y. Cassagnou, R. Legrain, C. Lebrun, E. Rosato, R. MacGrath, S.C. Jeong, S.M. Lee, Y. Nakashima, T. Nakagawa, M. Oghihara, J. Kasagi and T. Motobayashi : Nucl. Phys. **A551** (1993) 333.
24. Giant Dipole Resonance γ -ray Decay in Hot Nuclei.
J. Kasagi and K. Yoshida : Nucl. Phys. **A557** (1993) 221c.
25. Charged-Particle Calorimetry of $^{40}\text{Ar}+^{27}\text{Al}$ Reaction from 36 to 65 MeV/u.
D. Cussol, G. Bizard, R. Brou, D. Durand, M. Louvel, J. P. Patry, J. Peter, R. Regimbart, J.C. Steckmeyer, J.P. Sullivan, B. Tamain, E. Crema, H. Doubre, K. Hagel, G. M. Jin, A. Peghair, F. Saint-Laurent, Y. Cassagnon, R. Legrain, C. Lebrun, E. Rosato, R. MacGrath, S.C. Jeong, S.M. Lee, Y. Nakashima, T. Nakagawa, M. Oghihara, J. Kasagi and T. Motobayashi : Nucl. Phys. **A561** (1993) 298.
26. Symmetric Mass Division Process in Nuclei with Mass Numbers Around $A_n=100$.
Y. Nagame, H. Ikezoe and T. Ohtsuki : Phys. Rev. **C47** (1993) 1586.
27. Systematic Variation of Fission Barrier Heights for Symmetric and Asymmetric Mass Division.
T. Ohtsuki, H. Nakahara, Y. Nagame : Phys. Rev. **C48** (1993) 1667.
28. Fragment Isotope Spectra from the $^{36}\text{Ar}+\text{Ag}$ Reaction at 35 MeV/nucleon.
A. Horvath, F. Deak, A. Kiss, Z. Sere, A. Galonsky, C.K. Gelbke, H. Hamma, L. Heilbronn, D. Krofcheck, W.G. Lynch, D.W. Sackett, H. R. Shelin, M.B. Tsang, J. Kasagi and T. Murakami : Phys. Rev. **C49** (1994) 1012.
29. Giant Dipole Resonances in Very Hot Nuclei.

J. Kasagi and K. Yoshida : Nucl. Phys. **A569** (1994) 195c.

30. ${}^4\text{He}$ (${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$) ${}^5\text{He}$ (g.s.) Reaction at 118 MeV, and Its Distorted Wave Born Approximation Interpretation.

R.E. Wamer, J.M. Fetter, R.A. Swartz, A. Okihana, T. Konishi, T. Yoshimura, P.D. Kunz, M. Fujiwara, K. Fukunaga, S. Kakigi, T. Hayashi, J. Kasagi and N. Koori : Phys. Rev. **C49** (1994) 1534.

31. Three-Body ${}^3\text{He}$ Photodisintegration in the \mathcal{A} Region.

T. Emura, S. Endo, G. M. Huber, H. Itoh, S. Kato, M. Koike, O. Konno, B. Lasiuk, G.J. Lolos, K. Maeda, T. Maki, K. Maruyama, H. Miyamoto, R. Naridomi, K. Niki, T. Ogata, C. Rangacharyulu, A. Sasaki, T. Suda, Y. Sumi, Y. Wada and H. Yamazaki : Phys. Rev. **C49** (1994) R597.

32. Total Cross Section for Photon Absorption by Two Protons in ${}^3\text{He}$.

T. Emura, S. Endo, G.M. Huber, H. Itoh, S. Kato, M. Koike, O. Konno, B. Lasiuk, G.J. Lolos, K. Maeda, T. Maki, K. Maruyama, H. Miyamoto, R. Naridomi, K. Niki, T. Ogata, C. Rangacharyulu, A. Sasaki, T. Suda, Y. Sumi, Y. Wada and H. Yamazaki : Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 404.

33. Quasi-free K^+ Photo-Production in ${}^{12}\text{C}$.

K. Maeda, H. Yamazaki, S. Asano, T. Emura, I. Endo, S. Ito, H. Itoh, K. Ifuku, O. Konno, M. Koike, K. Maruyama, K. Niwa, H. Okuno, A. Sakaguchi, T. Sasaki, T. Suda, Y. Sumi, M. Takeya, T. Terasawa, H. Uchida, H. Yamashita and K. Yoshida : Nucl. Phys. **A557** (1994) 277c.

34. 閾値近傍の ${}^{12}\text{C}$ (γ, K^+) 反応.

前田和茂, 山崎寛仁 : 日本物理学会誌 **49** (1994) 366.

35. Pre-scission and Post-scission Charged Particle Emission from the ${}^{19}\text{F} + {}^{159}\text{Tb}$ Reaction.

H. Ikezoe, Y. Nagame, I. Nishinaka, Y. Sugiyama, Y. Tomita, K. Ideno, S. Hamada, N. Shikazono, A. Iwamoto and T. Ohtsuki : Phys. Rev. **C49** (1994) 968.

36. Measurement of the Thermal Neutron Cross Section of the ${}^{90}\text{Sr}(n, \gamma){}^{91}\text{Sr}$ Reaction.

H. Harada, T. Sekine, Y. Hatsukawa, N. Shigeta, K. Kobayashi, T. Ohtsuki and T. Katoh : J. Nucl. Sci. Technol. **31** (1994) 173.

37. Bimodal Nature of Actinide Fission.
T. Ohtsuki, Y. Nagame, H. Ikezoe, K. Tsukada, H. Nakahara and I. Nishinaka :
J. Alloys and Compounds **213/214** (1994) 423.
38. Fragment Mass and Kinetic Energy Distributions from Fission of Light Actinides.
I. Nishinaka, M. Tanikawa, S. Miyamoto, K. Sueki, H. Nakahara, K.
Tsukada, M. Magara, Y. Nagame, H. Ikezoe and T. Ohtsuki : J. Alloys and
Compounds **213/214** (1994) 426.
39. Mass Yield and Angular Distribution of Rare Earth Element Produced in Proton-
induced Fission of ^{244}Pu .
K. Tsukada, N. Shinohara, Y. Nagame, S. Ichikawa, M. Magara, M. Hoshi,
K. Sueki, M. Tanikawa, I. Nishinaka, T. Kobayashi, H. Nakahara and
T. Ohtsuki : J. Alloys and Compounds. **213/214** (1994) 414.
40. The $^{12}\text{C}(\gamma, \text{K}^+)$ Reaction in the Threshold Region.
H. Yamazaki, K. Maeda, S. Asano, T. Emura, S. Endo, S. Ito, H. Itoh,
K. Ifuku, O. Konno, K. Maruyama, K. Niwa, A. Sakaguchi, T. Sumi, M.
Takeya, T. Terasawa and H. Yamashita : Phys. Rev. **C52** (1995) R1577.
41. Reply to "Comment on "Total Cross Section for Photon Absorption by Two Protons
in ^3He ".
T. Emura, S. Endo, G. M. Huber, H. Itoh, S. Kato, M. Koike, O. Konno,
B. Lsiuk, G.J. Loios, K. Maeda, T. Maki, K. Maruyama, H. Miyamoto,
C. Rangacharyulu, A. Sasaki, T. Suda, Y. Sumi, Y. Wada and H. Yamazaki :
Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 1035.
42. Energetic Protons and α -Particles Emitted in 150-keV Deuteron Bombardment on
Deuterated Ti.
J. Kasagi, T. Ohtsuki, K. Ishii and M. Hiraga : J. Phys. Soc. Jpn, **64** (1995)
777.
43. Study of Pre-scission Evaporation for $^{84}\text{Kr}+^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/u Using 3 π -Phoswich
Detector System.
T. Nakagawa, K. Yuasa-Nakagawa, K. Furutaka, K. Matsuda, K.
Yoshida, Y. Futami, T. Mizota, Y. Honjo, N. Tomita, S.M. Lee, J. Kasagi

and W.Q. Shen : Nucl. Phys. **A583** (1995) 149.

44. Internal Excitation of Intermediate Mass Fragments from Collisions of $^{36}\text{Ar} + \text{Ag}$ Nuclei at 35 MeV/nucleon.
 F. Deak, A. Horvath, A. Kiss, Z. Seres, A. Galonsky, C.K. Gelbke, H. Hama, L.Heilbronn, D. Krofchek, W.G. Lynch, D. W. Sackett, H.R. Schelin, M.B. Tsang, J.Kasagi and T. Murakami : Phys. Rev. **C52** (1995) 219.
45. Entrance Channel Effect on the Pre-scission Time of Binary Decay for the Medium Mass Nuclei (mass \sim 110).
 K. Yuasa-Nakagawa, T. Nakagawa, K. Furutaka, K. Matsuda, Y. Futami, K. Yoshida, J. Kasagi, S.M. Lee, T. Suomijarvi, W.Q. Shen and T. Maysuse : Phys. Lett. **B351** (1995) 77.
46. Measurements of the D+D Reaction in Ti Metal with Incident Energies between 4.7 and 18 keV.
 J. Kasagi, T. Murakami, T. Yajima, S. Kobayashi and M. Ogawa : J. Phys. Soc. Jpn. **64** (1995) 3716.
47. Excitation Energy and Temperature of Hot Nuclei Produced in Incomplete Fusion.
 K. Furutaka, J. Kasagi, K. Yoshida, A. Yajima, Y. Akeboshi, K. Matsuda, T. Murakami, T. Nakagawa, K. Yuasa-Nakagawa, Y. Futami, G. Bizard and A. Galonsky : *Proc. 3rd IN2P3-Riken Symp. on Heavy Ion Collisions*, eds. T. Motobayashi, N. Frascaria and M. Ishihara (World Scientific Pub. 1995) p. 180.
48. Pre-and Post-Scission Charged Particle Multiplicity in Binary Decay Process for Medium Mass Nuclei.
 T. Nakagawa, K. Yuasa-Nakagawa, Y.Futami, K. Furutaka, K. Matsuda, K. Yoshida, T. Mizota, Y. Honjo, N. Tomita, T. Suomijarvi, W.Q.Schen, J. Kasagi, T. Matsuse and S.M. Lee, *ibid.* p. 139.
49. Cumulative Yields of Short-lived Ru Isotopes in the ^{12}C - and ^{19}F -induced Fission of ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U and ^{237}Np .
 N. Shinohara, K. Tsukada, S. Ichikawa, M. Magara and T. Ohtsuki : Radiochim. Acta **68** (1995) 21.

50. The Large-Acceptance Spectrometer TAGX for Photoreaction Studies at the 1.3-GeV Tokyo Electron Synchrotron.
K. Maruyama, G. Garino, S. Kato, M. Koike, Y. Murata, M. Mutou, K. Niki, K. Yoshida, M. Asai, S. Asano, I. Endo, S. Endo, M. Harada, S. Kasai, K. Miyamoto, Y. Sumi, A. Sasaki, K. Hossain, Z. Papandreou, H. Hasai, K. Iwatani, A. Leone, R. Perrino, Y. Wada, T. Maki, F. Farzanpay, G.M. Huber, M. Iurescu, G.J. Lolos, A. Weinerman, A. Hisadoman, H. Itoh, S. Maruo, H. Murooka, R. Naridomi, T. Ogata, J.C. Kim, B. Lasiuk, C. Rangacharyulu, O. Konno, A. Shinozaki, T. Terasawa, H. Yamazaki, K. Maeda, T. Suda, H. Shimizu, T. Emura, H. Hirose, K. Niwa, H. Miyamoto, N. Nagata and H. Yamashita : Nucl. Instru. and Meth. **A376** (1996) 335.
51. Binary Decay Fragment Cross Sections and Precission Charge Multiplicity in $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/Nucleon.
K. Yuasa-Nakagawa, J. Kasagi, T. Nakagawa, K. Yoshida, Y. Futami, S.M. Lee, K. Furutaka, K. Matsuda and W.Q. Shen : Phys. Rev.C**53** (1996) 997.
52. High Energy γ -Ray Production from Be, C and Al Targets with 65-MeV ^3He Bombardment.
M. Hosaka, K. Ishii, M. Ohura, A. Terakawa, S. Miyamoto, Z. Guan, H. Orihara and J. Kasagi : Phys. C**54** (1996) 2429.
53. Decay Mechanism of a Highly Excited Nucleus Produced in the Reaction $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/Nucleon.
Y. Futami, K. Yuasa-Nakagawa, T. Nakagawa, S.M. Lee, K. Furutaka, K. Matsuda, K. Yoshida, S.C. Jeong, H. Fujiwara, T. Mizota, Y. Honjo, S. Tomita, B. Heusch, K. Ieki, J. Kasagi, W.Q. Shen and T. Matsuse : Nucl. Phys. **A607** (1996) 85.
54. Observation of Isovector-Isoscalar Two-Body Currents in Deuteron Knockout from ^3He .
C.Tripp, G.S.Adams, D. Beck, K.Dow, J.M.Finn, V. Frolov, O. Hansen, T. Kobayashi, J. McIntyre, R. Lourie, M.Nozar, S. Nagorny, J. Shaw,

P. Stoler, T. Tamae, D. Tieger, W. Turchinetz, G. Warren, T.P. Welch, E.J. Winhoid, M. Witkowski, and B. Wojtsekhowski : *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 885.

55. Thermal Energy Dependence of Giant Dipole Resonance.

J. Kasagi : *Proc. of 2nd Japan-Italy Symposium on Perspectives in Heavy Ion Physics*, eds. M. Ishihara, T. Fukuda and C. Signorini (World Scientific Pub. 1996) p. 227.

56. Hot Nuclei ; Gamma-Ray and Particle Emission.

J. Kasagi : *Proc. 2nd China-Japan Joint Symposium on Nuclear Physics*, eds. Sun Zuxun and Xu Jincheng (China Institute of Atomic Energy, 1996) p. 83.

57. JAERI Recoil Mass Separator.

H. Ikezoe, Y. Nagame, T. Ikuta, S. Hamada, I. Nishinaka and T. Ohtsuki : *Nucl. Instr. Meth.* **A376** (1996) 420.

58. Two Deformation Paths in Proton Induced Fission of ^{232}Th .

Y. Nagame, I. Nishinaka, K. Tsukada, Y. Oura, S. Ichikawa, H. Ikezoe, Y.L. Zhao, K. Sueki, H. Nakahara, M. Tanikawa, T. Ohtsuki, H. Kudo, Y. Hamajima, K. Takamiya and Y.H. Chung : *Phys. Lett.* **B387** (1996) 26.

59. Alpha Decay of a New Isotope ^{209}Th .

H. Ikezoe, T. Ikuta, S. Hamada, Y. Nagame, I. Nishinaka, K. Tsukada, Y. Oura and T. Ohtsuki : *Phys. Rev.* **C54** (1996) 2043.

60. Azimuthal Distribution, Azimuthal Correlation and Reaction Plane Dispersion in the Reaction 10.6 MeV/Nucleon ^{84}Kr on ^{27}Al .

W.Q. Shen, W. Ye, Y. G. Ma, J. Feng, J.S. Wang, K. Yuasa-Nakagawa, T. Nakagawa, K. Yoshida, J. Kasagi, Y. Futami, S.M. Lee, K. Furutaka and K. Matsuda : *Phys. Rev. C* (1997) in press.

61. Exclusive Measurement of Proton Quasifree Scattering and Density Dependence of the Nucleon-Nucleon Interaction.

K. Hatanaka, M. Kawabata, N. Matsuoka, Y. Mizuno, S. Morinobu, M. Nakamura, T. Noro, A. Okihana, K. Sagara, K. Takahisa, H. Takeda, K.

Tamura, M. Tanaka, S. Toyama, H. Yamazaki and Y. Yuasa : Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1014.

62. Single and Double Delta Production in the ${}^3\text{He}(\gamma, \pi^+ \pi^-)$ Reaction at $380 \leq E_\gamma \leq 700$ MeV.

D.G. Watts, G.M. Huber, G.J. Lolos, B. Lasiuk, S. Kato, M. Koike, K. Maruyama, K. Niki, Y. Wada, K. Maeda, T. Suda, T. Emura, H. Miyamoto, S. Endo, Y. Sumi, O. Konno, H. Yamazaki, H. Itoh, T. Maki and A. Sasaki : Phys. Rev. **C55** (1997) 1832.

63. The Feature of the JAERI Recoil Mass Separator.

H. Ikezoe, T. Ikuta, S. Mitsuoka, S. Hamada, Y. Nagame, I. Nishinaka, Y. Tsukada, Y. Oura and T. Ohtsuki : Nucl. Instr. and Meth. **B126** (1997) 340.

64. Nuclear Fission of Neutron-deficient Protactinium Nuclides.

I. Nishinaka, Y. Nagame, K. Tsukada, H. Ikezoe, K. Sueki, H. Nakahara, M. Tanikawa and T. Ohtsuki : Phys. Rev. **C56** (1997) 891.

65. Highly Asymmetric mass Division in Low-Energy Proton-Induced Fission of ${}^{232}\text{Th}$ and ${}^{244}\text{Pu}$.

K. Tsukada, N. Shinohara, I. Nishinaka, S. Ichikawa, Y. Nagame, K. Sueki, T. Kobayashi, H. Nakahara, M. Tanikawa and T. Ohtsuki : Radiochim. Acta **76** (1997) 173.

編 集 委 員

斎 藤 悌二郎 (委員長) 寺 沢 辰 生
新 村 信 雄 大 槻 勤

核 理 研 研 究 報 告 第30卷 第1号

1997年9月発行

発行所 東北大学理学部附属原子核理学研究施設
 仙台市太白区三神峯1-2-1(郵便番号982)
 電話 022-743-3411

印刷所 株式会社 東北プリント
 仙台市青葉区立町24番24号
 TEL (263) 1166 (代)

RESEARCH REPORT OF
LABORATORY OF NUCLEAR SCIENCE
TOHOKU UNIVERSITY

Volume 30 Number 1 September 1997

Laboratory of Nuclear Science,

Tohoku University,

1-2-1, Mikamine, Taihaku, Sendai 982, Japan