

RESEARCH REPORT  
OF  
LABORATORY OF NUCLEAR SCIENCE  
TOHOKU UNIVERSITY

# 核 理 研 研 究 報 告

第 31 卷      第 1 号

1998 年 9 月

東北大学大学院理学研究科

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 982-0826

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31巻 第1号 目次

## I. 原子核物理

- I-1  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)^{39}\text{Ca}$  反応による巨大共鳴の研究 ..... 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\*\*, 山形大理  
学部\*\*\*)

吉田 耕平, 齋藤梯二郎, 及川正道, 遠藤 卓哉, 木野 幸一  
高橋 一憲, 中川 武美\*, 阿部 健\*\*, 上野 博昭\*\*\*

## II. 放射化学

- II-1 Diffusion of Magnesium in Al-Zn-Mg Alloys ..... 15  
(工学研究科材料物性)

藤川辰一郎

- II-2 水生無セキツイ動物の光量子放射化分析 ..... 22  
I. 節足動物甲殻類

(石巻専修大理工)

福島美智子, 玉手 英利

- II-3 薄膜中の炭素, 窒素の非破壊光量子放射化分析法の検討 ..... 30  
(NTT 光エレクトロニクス研, KEK放射線科学センター\*, 核理研\*\*)

鹿野 弘二, 加藤 正明, 榎本 和義\*, 大槻 勤\*\*

- II-4 Formation of Radioactive Hetero-Fullerenes ..... 40  
(核理研, KEK放射線科学センター\*, 都立大理\*\*, NTT光エレクトロニ  
クス研\*\*\*)

大槻 勤, 榎本 和義\*, 末木 啓介\*\*, 鹿野 弘二\*\*\*  
重松 俊男\*\*\*

## III. 加速器・測定装置

- III-1 ストレッチャー・ブースタリングの高周波加速系 ..... 51  
(核理研)

内田 智久, 小山田正幸, 日出富士雄, 浦澤 茂一  
封 碧波, 渡辺 勝美



Ⅲ-2	ストレッチャー・ブースタリングの真空系	61
	(核理研)	
	今野 收	
Ⅲ-3	ストレッチャー・ブースタリングのビームモニター系	80
	(核理研)	
	柴崎 義信	
Ⅲ-4	ストレッチャー・ブースタリングの制御系	84
	(核理研)	
	武藤 正勝, 七尾 晶士, 柴崎 義信	
Ⅲ-5	東北大学300MeV リニアックの改良・保守の30年	94
	(核理研)	
	浦澤 茂一	
Ⅲ-6	中性子エネルギー分解能向上のための散乱電子飛行時間補正	121
	(核理研, 理学研究科物理 <sup>*</sup> , 工学研究科量子エネルギー工学 <sup>**</sup> , 山形大理 学部 <sup>***</sup> )	
	木野 幸一, 齋藤悌二郎, 高橋 一憲, 中川 哲郎	
	中川 武美 <sup>*</sup> , 阿部 健 <sup>**</sup> , 上野 博昭 <sup>***</sup>	
Ⅲ-7	偏極重水素標的の解離度および偏極度測定用イオン抜き出し系の試作	130
	(核理研, 理学研究科物理 <sup>**</sup> )	
	西川 至, 玉江 忠明, 今野 收, 佐藤 祥幸	
	阿部 和廣, 横川 民雄, 宮瀬 晴久 <sup>*</sup> , 坪田 博明 <sup>*</sup>	
	田中 英二 <sup>*</sup>	
Ⅲ-8	Data Acquisition System using Windows NT <sup>TM</sup> Workstation	136
	(核理研)	
	川端 正徳, 武藤 正勝	



IV. 加速器稼働状況

IV-1 平成9年度マシン報告..... 149

(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

V. 論文リスト..... 153



Research Report of Laboratory of Nuclear Science  
Volume 31, Number 1 June 1998  
Contents

I. Nuclear Physics

- I - 1 Study of the Giant Resonance by the  $^{40}\text{Ca} (e, e' n) ^{39}\text{Ca}$  Reaction ..... 1  
Kohei Yoshida, Tejiro Saito, Masamichi Oikawa, Takuya Endo,  
Kouichi Kino, Kazunori Takahashi, Takemi Nakagawa, Ken Abe and  
Hiroaki Ueno

II. Radiochemistry

- II - 1 Diffusion of Magnesium in Al-Zn-Mg Alloys ..... 15  
Shin-Itiroh Fujikawa
- II - 2 Photon Activation Analysis of Trace Elements in Several Kinds of  
Invertebrate Animals. I. Arthropoda Crustacea ..... 22  
Michiko Fukushima and Hidetoshi Tamate
- II - 3 Non-Destructive Photon Activation Analysis of Carbon and Nitrogen in  
Thin Films ..... 30  
Koji Shikano, Masaaki Katoh, Kazuyoshi Masumoto and  
Tsutomu Ohtsuki
- II - 4 Formation of Radioactive Hetero-Fullerenes ..... 40  
Tsutomu Ohtsuki, Kazuyoshi Masumoto, Keisuke Sueki, Koji Shikano  
and Toshio Shigematsu

III. Accelerator and Instrumentation

- III - 1 RF System for the Stretcher Booster Ring ..... 51  
Tomohisa Uchida, Masayuki Oyamada, Fujio Hinode,  
Shigekazu Urasawa, Bibo Feng and Katumi Watanabe
- III - 2 Vacuum System for the Stretcher Booster Ring ..... 61  
Osamu Konno

III – 3	Beam Monitor System for the Stretcher Booster Ring .....	80
	Yoshinobu Shibasaki	
III – 4	Control System for the Stretcher Booster Ring .....	84
	Masakatsu Mutoh, Masashi Nanao and Yoshinobu Shibasaki	
III – 5	Improvements and Maintenance of the Tohoku University 300 MeV Linac for Thirty Years .....	94
	Shigekazu Urasawa	
III – 6	Correction of Scattered Electron Flight Path for the Improvement of Neutron Energy Resolution .....	121
	Kouichi Kino, Teijiro Saito, Kazunori Takahashi, Tetsuro Nakagawa, Takemi Nakagawa, Ken Abe and Hiroaki Ueno	
III – 7	Development of an Ion Extraction System for Mass Analysis and Polarization Measurement for a Polarized Deuterium Target .....	130
	Itaru Nishikawa, Tadaaki Tamae, Osamu Konno, Yoshiyuki Satoh, Kazuhiro Abe, Tamio Yokokawa, Haruhisa Miyase, Hiroaki Tsubota and Eiji Tanaka	
III – 8	Data Acquisition System using Windows NT™ Workstation .....	136
	Masanori Kawabata and Masakatsu Mutoh	
IV. Status Report on the Accelerator		
IV – 1	Status of the Electron Linac .....	149
	Akira Kurihara, Shigekazu Urasawa, Masayuki Oyamada, Yoshinobu Shibasaki and Shigenobu Takahashi	
V.	List of Publications .....	153



# I. 原 子 核 物 理

# $^{40}\text{Ca}(e, e'n)^{39}\text{Ca}$ 反応による巨大共鳴の研究

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\*\*\*

吉田耕平・齋藤悌二郎・及川正道  
遠藤卓哉・木野幸一・高橋一憲  
中川武美\*・阿部 健\*\*・上野博昭\*\*\*

## § 1. 序 論

$^{40}\text{Ca}$  核のアイベクトル四重極巨大共鳴 (以下 IVGQR) については, Murakami<sup>1)</sup>らが IVGQR が存在すると予測されている, 双極子巨大共鳴 (GQR) 領域よりも高い励起エネルギー  $\omega = 20 \sim 40\text{MeV}$  において  $^{40}\text{Ca}(\gamma, n)$  実験を行った。そこで測定された angular asymmetry から, 励起エネルギーが  $30\text{MeV}$  付近で GDR よりもかなり広く分布する IVGQR の存在を報告した。これは, 大量の GDR の裾と少量の IVGQR との干渉が asymmetry の急激な変化をもたらすことを利用して, IVGQR の位置を決定しようとするものであった。また, Laymonら<sup>2)</sup>が  $^{40}\text{Ca}(n, \gamma)$  反応において同様の測定を行い, 励起エネルギー  $32\text{MeV}$ , 幅  $10\text{MeV}$  の IVGQR の存在を報告している。

( $e, e'n$ ) 実験においては, ( $e, e'$ ) 電子散乱実験でみられるような radiation tail による影響の心配がない。更に GDR 領域よりも励起エネルギーの高い領域にあると考えられる IVGQR を測定するための, 光核反応に比べて高い運動量移行での実験が可能である。また我々には GDR 領域における  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)$  実験の測定の経験もある。これらのことから, 今回の実験では IVGQR 領域における  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)$  反応の断面積及び角分布を測定することを目的としている。

## § 2. 実 験

実験は東北大学理学部附属原子核理学研究施設の電子線形加速器からの電子線を用いて行われた。線形加速器によって加速された電子線は, パルスビームストレッチャーで連続電子線に変換された後散乱槽内のターゲットに照射される。ターゲットにより散乱された電子は, 二重収束型磁気スペクトロメーター (LDM) にて運動量分析された後, 焦点面に設置された垂直型ドリフトチェンバー (VDC) によって位置が検出される。一方ターゲットから放出された中性子は, 散乱槽の周りに距離  $1\text{m}$  で設置された10台の中性子検出器によって検出される。



中性子検出器は円筒形のアルミケースに収められた液体シンチレーター NE213 と光電子増倍管 R1250 から成っている。本実験で使用した液体シンチレーター NE213 は、直径180mm、厚さ103mmのものが8台、直径200mm、厚さ100mmのものが2台である。この NE213 は波形弁別により中性子と  $\gamma$  線の弁別が容易であるという特徴を持つ。

実験は on-plane ( $\phi = 180^\circ$ ) で行われた。その条件を第1表に、また中性子検出器の設置条件を第2表にまとめて示す。

第1表 実験条件。

入射電子エネルギー	129 MeV
散乱電子角度	$30^\circ$
励起電子エネルギー領域	28~35 MeV
運動量移行	$0.327 \sim 0.334 \text{ fm}^{-1}$

第2表 中性子検出器設置条件。

No.	$\theta_n$ (deg)	TOF (cm)	立体角 (msr)	吸収材 Bi (cm)	コリメータ $\phi$ (cm)
1	50	105	23.08	6	16, 16, 18, 18
2	70	105	23.08	4	16, 18, 18, 18
3	90	105	23.08	4	16, 18, 18, 20
4	110	105	23.08	4	16, 18, 18, 20
5	130	105	23.08	4	16, 18, 18, 20
6	150	105	23.08	4	16, 16, 18, 20
7	210	105	23.08	4	16, 16, 18, 18
8	230	105	23.08	4	16, 18, 18, 20
9	250	105	23.08	4	16, 18, 20, 20
10	270	105	23.08	4	16, 18, 20, 20

### § 3. 解析と結果

#### 3.1 ミッシングエネルギースペクトル

第1図に  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)$  反応の励起崩壊図を示す。残留核の状態を示すのにミッシングエネルギーと呼ばれる量が用いられ、以下の式で定義される。

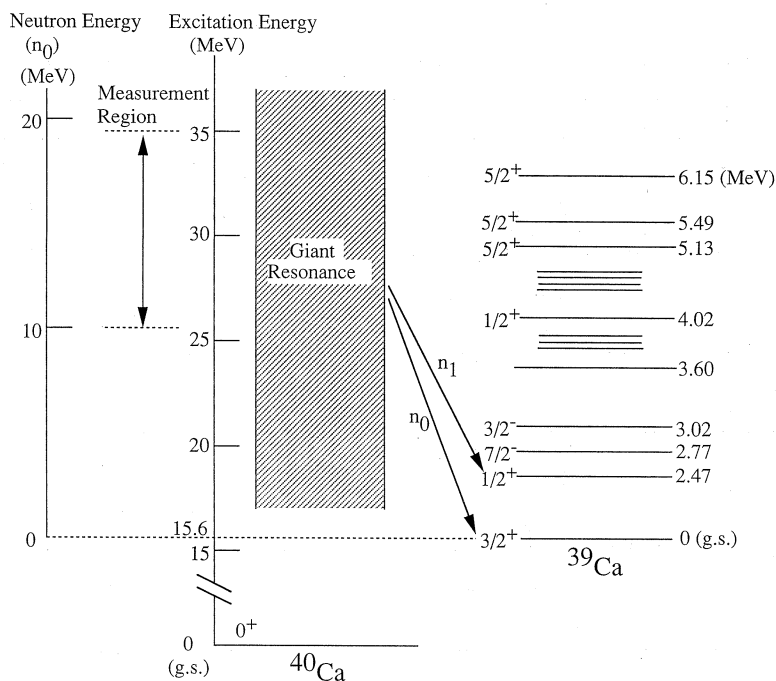
$$E_m = E_i - E_f - E_n - E_r \quad (1)$$

ここで  $E_m$  : ミッシングエネルギー

$E_i$  : 入射電子エネルギー

$E_f$  : 散乱電子エネルギー  
 $E_n$  : 中性子エネルギー  
 $E_r$  : 残留核反跳エネルギー

である。

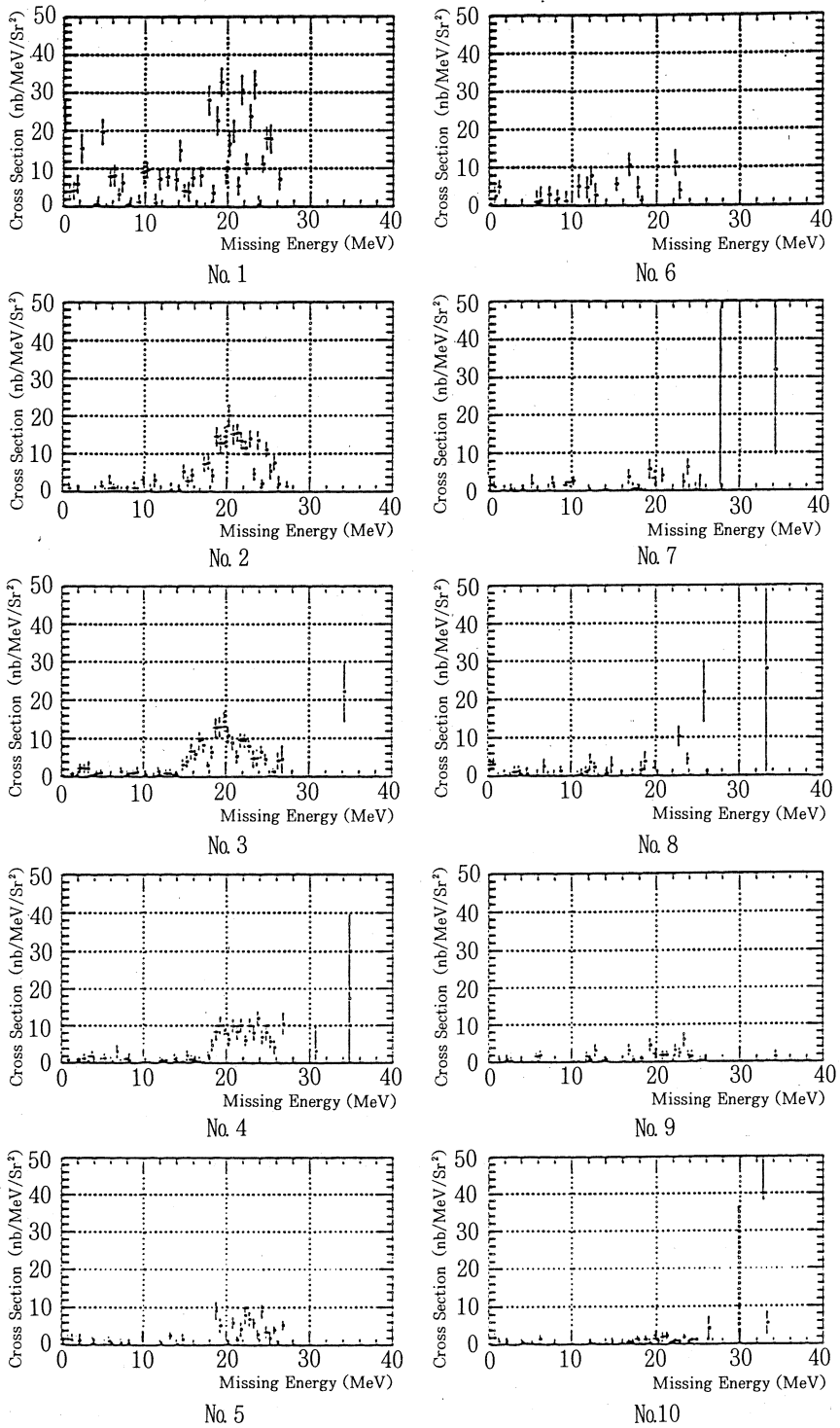


第1図  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)^{39}\text{Ca}$  反応の励起崩壊図。

このミッシングエネルギーは、残留核の励起エネルギーに標的核の中性子放出閾値を加えたものを意味し、このスペクトルに見られるピークの位置が残留核 $^{39}\text{Ca}$ のエネルギー準位に対応している。 $^{40}\text{Ca}$ の中性子放出閾値が15.6MeV、 $^{39}\text{Ca}$ の第1励起エネルギー状態が2.47MeVであるのでミッシングエネルギースペクトルにおける $n_0$ 、 $n_1$ の位置はそれぞれ15.6MeV、18.7MeVとなる。

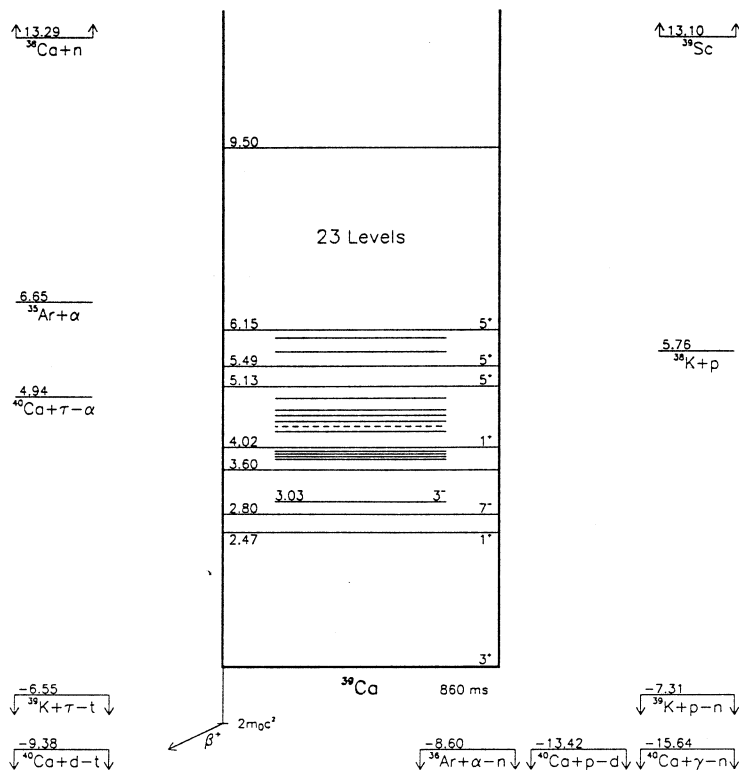
今回の実験で得られたミッシングエネルギースペクトルを第2図に示す。これらは偶然同時計数によるバックグラウンドを差し引き、今回の測定励起エネルギー領域28MeV~36MeVの全てを足し合わせたものである。これらのスペクトルには、先程述べた $n_0$ 、 $n_1$ に対応するピークが見られない。そのかわり、それらよりも5 MeV程高い20MeV付近にやや幅の広いピーク





第2図 ミッシングエネルギースペクトル ( $\omega = 28\text{MeV} \sim 35\text{MeV}$ )。

が見られる。またこのピークは検出器によっては2つのピークが合わさってできている様にも見える。第3図の $^{39}\text{Ca}$ のエネルギー準位にあるように、基底状態から5 MeV 程高いところに



第3図  $^{39}\text{Ca}$  のエネルギー準位<sup>3)</sup>

は近接する複数の状態が存在している。よって今回測定を行った GDR よりも高い励起状態からは、残留核の基底状態ではなく、基底状態よりも数 MeV 程高い励起状態へ崩壊するものと考えられるが、その状態を特定するまでには至っていない。

各 ND 毎でピークの大きさを比較すると、ND 2～4 のピークが ND 8～10 のそれに比べて明らかに大きくなっているのが分かる。このことから、運動量移行  $q$  方向に対して前方の断面積が大きくなっていることが予想される。

また、ND 1 と ND 6 は偶然同時計数事象が多くバックグラウンドの差し引きがうまくゆかなかったため、目的中性子事象をちゃんと捉えていないものが多い。そのため次節で述べる角分布の解析は、ND 6 を外して行った。

### 3.2 角分布

Kleppinger らによる SLRA (Static Limit Resonance Approximation)<sup>4)</sup>を用いると本研究のプロープである (e, e' n) 反応の断面積を以下の様に表すことができる。

$$\frac{d^3\sigma}{d\omega d\Omega_e d\Omega_n} = \sigma_M [V_L W_L + V_T W_T + V_{LT} W_{LT} \cos \phi + V_{TT} W_{TT} \cos 2\phi] \quad (2)$$

ここで

$$\sigma_M = \{\alpha^2 \cos^2(\theta/2)\} / \{4 E_i^2 \sin^4(\theta/2)\}$$

で与えられ,  $V_L$ ,  $V_T$ ,  $V_{LT}$ ,  $V_{TT}$  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。(  $T$  は横偏極成分で,  $LT$  項,  $TT$  項は  $L$  と  $T$ ,  $T$  と  $T$  の干渉項)  $\phi$  は散乱平面と反応平面の間の角度を表わす。

一般に(2)式で示される反応断面積を E2 までの寄与を考慮してルジャンドル関数で近似すると, 次の様になる。

$$\begin{aligned} V_L W_L + V_T W_T &= A_0 [1 + b_1 P_1(x) + b_2 P_2(x) + b_3 P_3(x) + b_4 P_4(x)] \\ V_{LT} W_{LT} &= c_2 [c_1 P_1(x) + P_2(x) + c_3 P_3(x)] \\ V_{TT} W_{TT} &= d_2 P_2(x) \end{aligned} \quad (3)$$

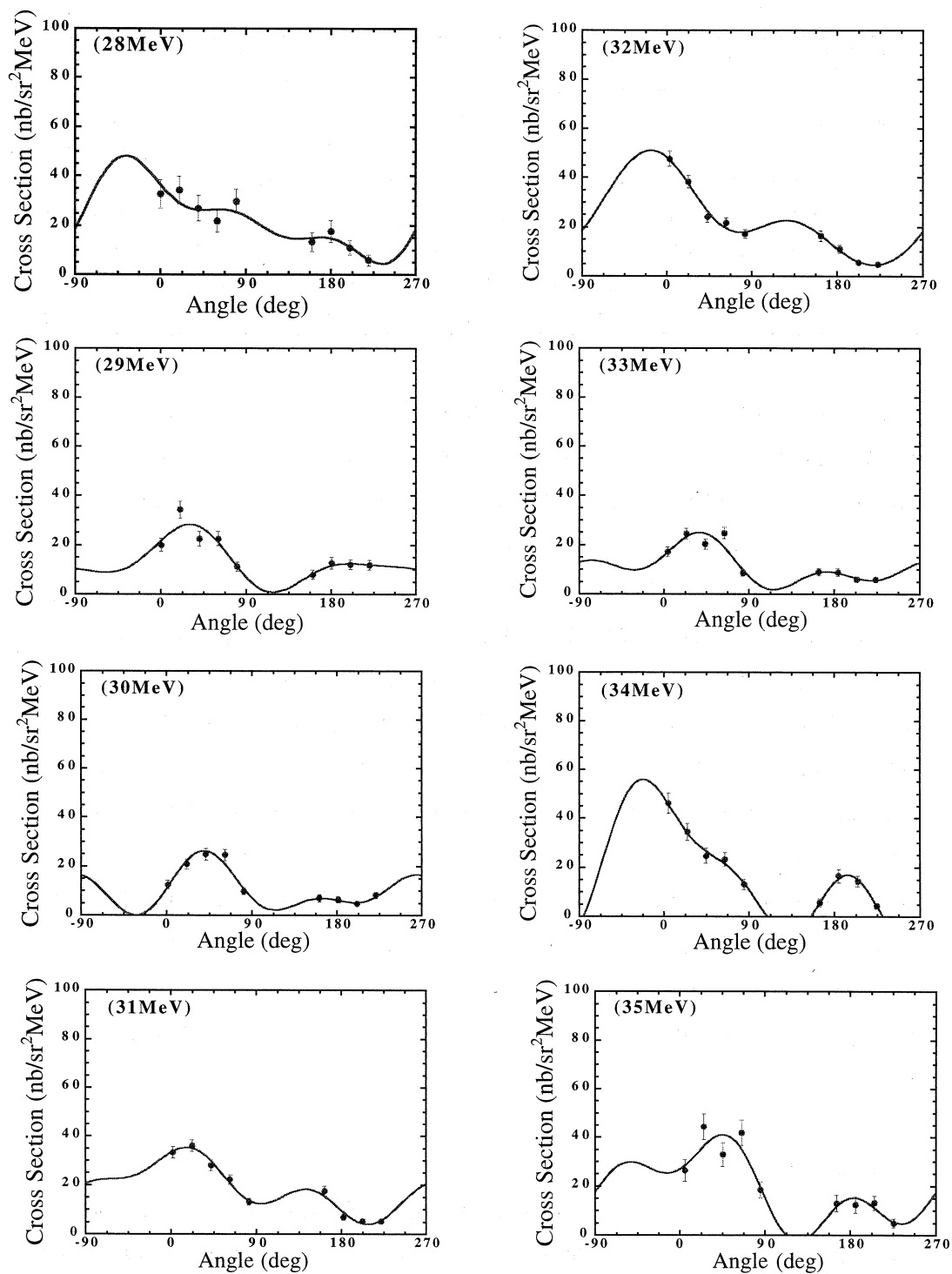
ここで, 測定点が 9 点とかぎられているため以下の二つの仮定をおいてパラメータを限定する。

- E2 励起は E1 励起に比べて弱いとし  $b_4$  パラメータを除く。
- 縦-横干渉項において, さらに E1 と E2 の干渉を表す第 1, 3 項は, 縦-横干渉が主である第 2 項に比べて小さいとして  $c_1$ ,  $c_3$  パラメータを除く。

以上より, 6 つのパラメータ  $A_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $c_2$ ,  $d_2$  を用いた次式の関数で角分布を  $\chi^2$  フィットした。

$$\begin{aligned} \frac{d^3\sigma}{d\omega d\Omega_e d\Omega_n} &= \sigma_M A_0 \{1 + b_1 P_1(x) + b_2 P_2(x) + b_3 P_3(x) - c_2 P_2(x) + d_2 P_2(x)\} \\ x &= \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

各励起エネルギーについて得られた角分布を第 4 図に示す。角度  $\theta$  は  $q$ -方向 (運動量移行方向) からの量である。共鳴状態が E1 のみであるならば,  $q$ -方向, 反  $q$ -方向で対称なピークをもたずであるが, この角度分布は明らかに  $q$ -方向に大きなピークを, 反  $q$ -方向に小さなピークを持つ非対称な角分布となっている。このことから他の多重極度の励起状態, すなわち E2 の存在が確認される。



第4図 各励起エネルギーごとの角分布。



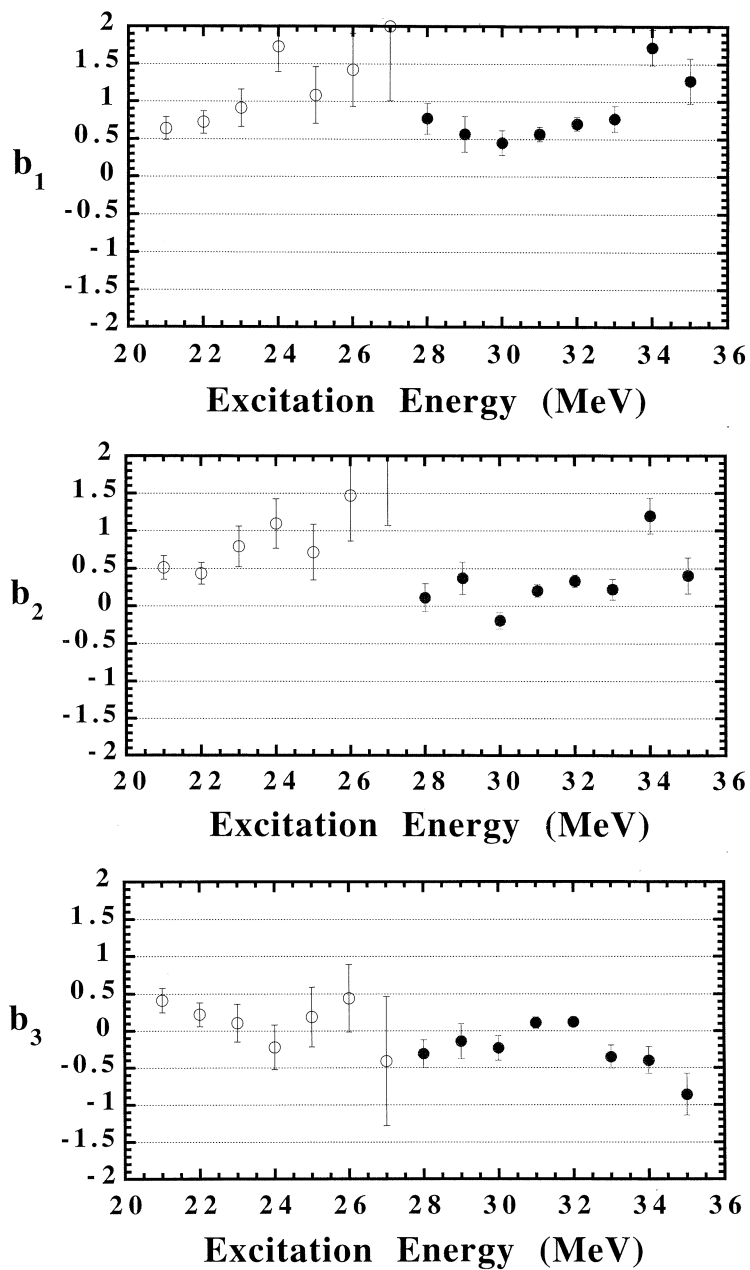
第3表  $^{40}\text{Ca}(e, e'n)$  反応の角分布の  $\chi^2$  フィッティングパラメータ。

$E_x(\text{MeV})$	$A_0(\times 10^{-6})$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$c_2(\times 10^{-6})$	$d_2$
28	$0.874 \pm 0.130$	$0.763 \pm 0.208$	$0.132 \pm 0.190$	$-0.285 \pm 0.194$	$-0.259 \pm 0.057$	$-0.077 \pm 0.070$
29	$0.434 \pm 0.059$	$0.630 \pm 0.252$	$0.479 \pm 0.237$	$-0.176 \pm 0.249$	$0.894 \pm 0.347$	$0.108 \pm 0.075$
30	$0.410 \pm 0.041$	$0.441 \pm 0.163$	$-0.187 \pm 0.110$	$-0.215 \pm 0.166$	$1.091 \pm 0.292$	$0.293 \pm 0.059$
31	$0.703 \pm 0.045$	$0.552 \pm 0.096$	$0.183 \pm 0.082$	$0.100 \pm 0.077$	$-0.081 \pm 0.070$	$0.146 \pm 0.035$
32	$0.860 \pm 0.052$	$0.704 \pm 0.090$	$0.336 \pm 0.082$	$0.126 \pm 0.067$	$-0.313 \pm 0.048$	$-0.005 \pm 0.033$
33	$0.417 \pm 0.041$	$0.729 \pm 0.172$	$0.145 \pm 0.134$	$-0.413 \pm 0.166$	$0.577 \pm 0.238$	$0.177 \pm 0.057$
34	$0.500 \pm 0.058$	$1.895 \pm 0.274$	$10.406 \pm 0.282$	$-0.570 \pm 0.210$	$-0.239 \pm 0.189$	$-0.359 \pm 0.086$
35	$0.695 \pm 0.092$	$1.104 \pm 0.240$	$0.1712 \pm 0.183$	$-0.774 \pm 0.233$	$0.243 \pm 0.184$	$0.044 \pm 0.080$

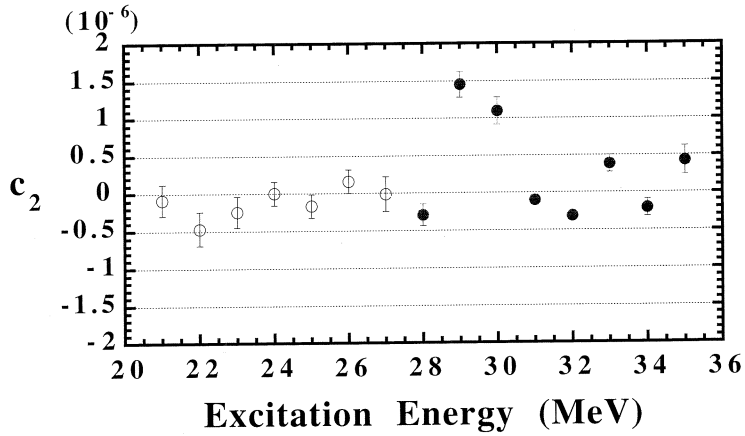
次に得られたフィッティングパラメーターを第3表に示す。ミッシングエネルギースペクトルにおいて  $n_0$  に対応するピークがほとんど無かったことから、得られたパラメーター  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $c_2$ ,  $d_2$  を前回の  $^{40}\text{Ca}(e, e'n_1)$ <sup>5)</sup> で得られたものと比較する。この  $n_1$  事象には分離できなかった  $n_2$ ,  $n_3$  事象も含まれているので今回のものと比較するには好都合である。第5図に得られた  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  を、第6図に  $c_2$ , 第7図に  $d_2$  を示す。今回の実験点が黒丸、前回の実験点が白丸である。 $b_1$  は共に0.5以上の値で0でなく、E1-E2の干渉が確認できる。又  $b_3$  は双方とも0の近傍である。E1, E2を表す  $b_2$  は今回の結果の方が若干小さな値をとっている。縦-横干渉項  $c_2$  は電子散乱による同時計数実験に特徴的な量で、縦成分換算行列要素と横成分換算行列要素との位相差を示している。今回の実験点は多少ばらつきが大きいですが、励起エネルギー-29, 30MeVの2点を除いた他の点は0の近傍で、前回のものと大して離れていない。しかし Siegert 定理<sup>6)</sup> が成り立てば縦、横成分の位相差は負の値をとるはずであるので、位相差に関する有意義な情報は得られなかったと思われる。 $d_2$  は横成分どうしの干渉項であり、Siegert の定理より縦成分に対する横成分が  $-0.66$  と小さく ( $\omega = 31\text{MeV}$ ),  $V_L : V_T : V_{LT} : V_{TT} = 0.6 : 0.8 : 0.7 : 0.4$  となることから  $d_2$  の値は小さくなると予想された。結果は予想どおりで全ての点が  $\pm 0.5$  以内におさまっており、他のパラメーターよりも小さな値をとっている。

### 3.3 断面積

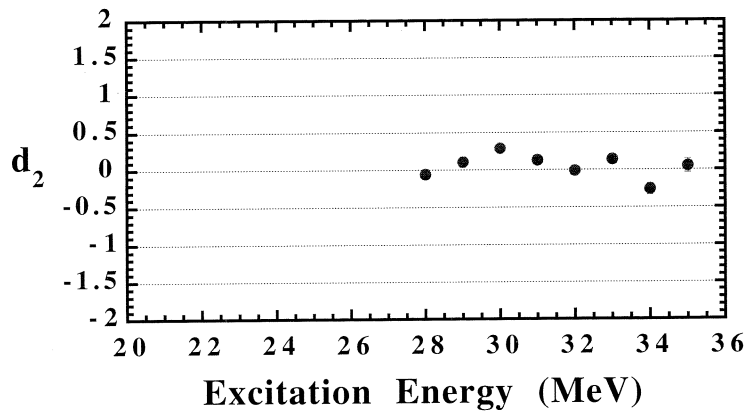
ここでは、 $(e, e'n)$  と  $(\gamma, n)$  の断面積を比較する。前節でも述べたように、反応断面積のほとんどが E1 共鳴で占められ、角分布の  $q$ -方向、反  $q$ -方向の非対称性は E1 共鳴状態と E2 共鳴状態との干渉効果によるものとみなすことができる。



第5図 パラメータ  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ .  
○: 文献5, ●: 今回の実験。



第6図 パラメータ  $c_2$ .  
○: 文献5, ●: 今回の実験.



第7図 パラメータ  $d_2$ .

そこで Kleppinger と Walecka による Static Limit Resonance Approximation (共鳴状態の経路を仮定しての原子核の非相対論的な取り扱い) を用いると, 縦, 横, 縦-横の構造関数は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 W_L &= D |C1(q)|^2 [1 + d_1 P_1(x_n) + d_2 P_2(x_n) + d_3 P_3(x_n)] \\
 W_T &= D |T1(q)|^2 [1 - (1/2)d_2 P_2(x_n)] \\
 W_{LT} &= D(d_2 \sqrt{2}) \text{Re}(C1(q)^* T1(q)) [c_1 P_1^1(x_n) + P_2^1(x_n) c_3 P_3^3(x_n)] \\
 D &= B_r / Z^2
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ここで  $B_r$  は  $n_0$  や  $n_1$  の分岐比である。(3)式と(5)式の係数の関係から以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned}
 A_0 &= D [V_L |C1(q)|^2 + V_T |T1(q)|^2] = DV_L |C1(q)|^2 (1 + \delta) \\
 b_1 &= d_1 / (1 + \delta) \\
 b_2 &= d_2 [1 - (1/2) \delta] / (1 + \delta) \\
 b_3 &= d_3 / (1 + \delta) \\
 c_2 &= DV_{LT} \sqrt{(1/2)} d_2 \text{Re}(C1(q) * T1(q))
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

ここで  $\delta$  は

$$\delta = (V_T / V_L) [T1(q) / C1(q)]^2
 \tag{7}$$

と定義されている。

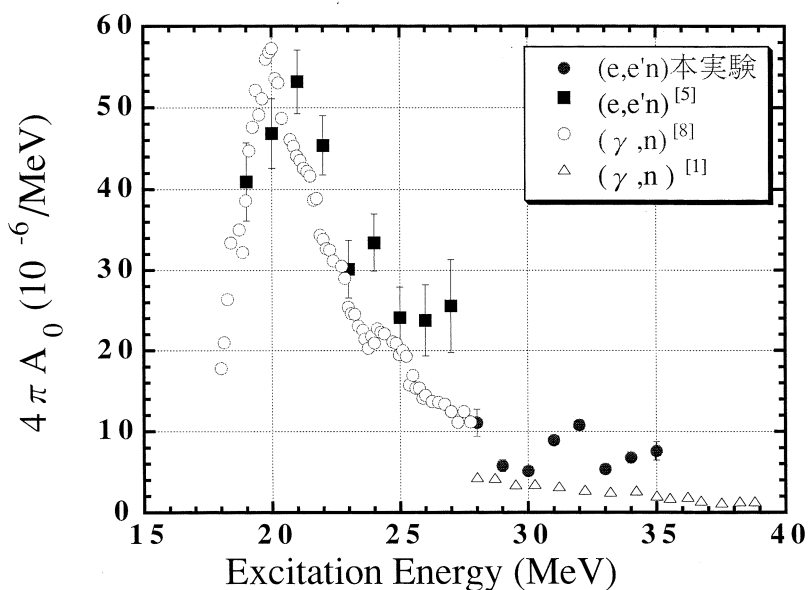
一方、光核反応での反応断面積は以下の式で表される。

$$d\sigma / d\Omega = (2\pi^2 \alpha / \omega) 3B_r |T1(\omega)|^2 [1 + a_1 P_1(x_n) + a_2 P_2(x_n) + a_3 P_3(x_n)]
 \tag{8}$$

この光核反応の断面積を  $A'_0$  とすると、(4)、(6)、(7)式を用いて  $\sigma_M A_0$  と  $A'_0$  を直接的に比較することができ、次の関数を得る。

$$\sigma_M A_0 / A'_0 = \sigma_M \omega (1 + \delta) V_L / 2\pi^2 \alpha Z^2 \cdot |C1(q)|^2 / |T1(\omega)|^2
 \tag{9}$$

ここに縦成分行列要素と横成分行列要素の比を与える Siegert 定理及び Goldhaber-Teller 模型<sup>6)</sup> で与えられる関係を用いると、次式が成り立つ。



第8図 断面積の比較。



$$A'_0/\sigma_M A_0 = 4\pi^2 \alpha \omega Z^2 / \sigma_M (1 + \delta) V_L q^2 \quad (10)$$

上式により  $(\gamma, n)$  反応の断面積を電子散乱のものに変換した結果と、今回の実験で得られた  $A_0$  とを比較する (第 8 図)。今回の  $(e, e'n)$  から求めた  $A_0$  を黒丸で、前回の  $(e, e'n)$  の結果を黒四角、Kellie<sup>8)</sup> らの  $(\gamma, n)$  から求めた  $A_0$  を白丸、Murakami らの  $(\gamma, n)$  から求めた  $A_0$  を白三角で示してある。縦軸は  $4\pi A_0$  であってあり、この値に Mott 散乱の断面積  $\sigma_M$  をかければ反応断面積となる。

まず、二つの  $(e, e'n)$  の結果は励起エネルギー 27MeV と 28MeV の点でうまくつながっていないが、低エネルギー側からの全体的な傾向を考えればさほどの食い違いだとは思われない。次に二つの光核反応との比較であるが、Kellie らの結果とは励起エネルギー 28MeV で非常に滑らかにつながっている。また Murakami らの結果と比べてみると、今回の実験点のほうがやや大きめの値をとっている。これは、彼等の実験が 4 MeV 以下のエネルギーを持つ放出中性子に限定しているため、更に高いエネルギーのものまで含めている我々の結果のほうが大きくなっているものと思われる。

また、IVGQR が存在すると考えられている 32MeV 付近の断面積が盛り上がっているが、IVGQR の幅がかなり広いと考えられていることから、この盛り上がりが IVGQR の存在を示すものだとは言い難い。

#### § 4. まとめ

<sup>40</sup>Ca 核のアイソベクトル四重極巨大共鳴 (IVGQR) 領域の断面積及び角分布を得ることを目的とし、<sup>40</sup>Ca(e, e'n) 反応の測定を行なった。

ミッシングエネルギースペクトルにおいて中性子放出閾値よりも 5 MeV 程高いところにピークが現れたことから、今回測定を行なった GDR よりも高い励起エネルギー領域からは残留核 <sup>39</sup>Ca の基底状態への崩壊よりも、基底状態よりも 5 MeV 程高い複数の連続する励起状態へ崩壊する確率が高いと考えられる。しかし、それら複数の準位の特定までには至らなかった。

導出された角分布は  $q$ -方向に大きなピーク、反  $q$ -方向に小さなピークを持つ非対称なものとなり、E2 の存在が確認できた。この角分布をルジャンドル関数で近似し、 $\chi^2$  フィッティングして得られたパラメーターでは、E1-E2 干渉を表す  $b_1$ ,  $b_3$  が 0 でない値をとり E1-E2 の干渉が確認されたことで E2 の存在が示唆された。アイソスカラー、アイソベクトル E2 の重心エネルギーがそれぞれ 19, 35MeV だと予測されていることから、アイソベクトル E2 が混入しているものと考えられる。

断面積  $A_0$  は励起エネルギー28MeVまでの  $(\gamma, n)$  実験の結果と滑らかにつながったが、同じ励起エネルギー領域における  $(\gamma, n)$  実験の結果よりも少し大き目の値となった。

### 参 考 文 献

- 1) T. Murakami *et al.* : J. phys. **G 14** (1988) S 275.
- 2) C. M. Laymon, R. O. Nelson, S. A. Wender and L. R. Nilsson : Phys. Rev. C **46** (1992) 1880.
- 3) P. M. Endt : Nucl. Phys. **A521** (1990) 1.
- 4) D. W. Kleppinger and J. D. Warecka : Ann. Phys. **146** (1983) 349.
- 5) 高桑智恵 : 修士論文, 東北大学, 1990 ; C. Takakuwa, T. Saito, S. Suzuki, K. Takahisa, T. Tohei, T. Nakagawa and K. Abe : Phys. Rev. C **50** (1994) 845.
- 6) A. J. F. Siegert : Phys. Rev. **52** (1937) 787.
- 7) M. Goldhaber and E. Teller : Phys. Rev. **74** (1948) 1046.
- 8) J. D. Kellie, A. R. Curran, S. J. Hall, G. I. Crawford, J. L. Robertson and D. T. Burns : Nucl. Phys. **A 515** (1990) 125.

## II. 放 射 化 学



# Diffusion of Magnesium in Al-Zn-Mg Alloys

S.-I. Fujikawa

*Department of Materials Science, Faculty of Engineering,  
Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan*

The tracer diffusion coefficients of  $^{28}\text{Mg}$  at 743 K in the region of  $\alpha$ -solid solution of the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys were determined using the residual activity method. Carrier-free radioactive tracer  $^{28}\text{Mg}$  was prepared by using the photonuclear reaction,  $^{30}\text{Si}(\gamma, 2\text{p})^{28}\text{Mg}$ . The dependence of the diffusion coefficients on MgZn<sub>2</sub> concentration in the Al-MgZn<sub>2</sub> alloys was determined.

## § 1. Introduction

Al-Zn-Mg alloys are practically very important precipitation-hardening alloys. The diffusion data of Mg and Zn in the alloys are indispensable to analyze the fundamental behavior of the alloying elements in the alloys and to control the various heat treatments such as homogenization, quenching and to aging treatments of the alloys. The diffusion data for Zn in an Al-Zn-Mg alloys have been already reported<sup>1)</sup>. However, no diffusion data of Mg in the alloys have been yet reported because of generally unavailable radioactive tracer  $^{28}\text{Mg}$  with very short life-time ( $t^{1/2} = 7.54 \times 10^4 \text{ s}$ ). Recently, the diffusion coefficients of  $^{28}\text{Mg}$  in Al-Mg-Si alloys have been measured<sup>2)</sup>. As shown in Fig. 1, the Al-Zn-Mg system forms the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys<sup>3)</sup>. In the present work, the tracer diffusion coefficients of Mg in the pseudo-binary alloys were determined as preliminary studies at 743 K using the tracer  $^{28}\text{Mg}$  prepared by myself.

## § 2. Experimental Procedure

### 2.1 Preparation of carrier-free $^{28}\text{Mg}$

The details of the preparation of  $^{28}\text{Mg}$  have been already described in elsewhere<sup>4)</sup>. The 99.999 mass% purity silicon wafers for semiconductor industry was used as the target and



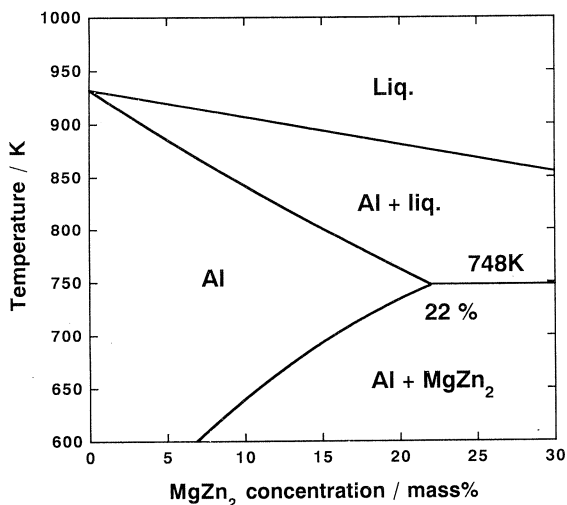


Fig. 1 Al-rich side phase diagram of pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> system.

was sealed in quartz tube of 10 mm in diameter. Bremsstrahlung irradiation was carried out at an electron energy of 60 MeV for  $8.64 \times 10^4$  s by 300 MeV 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 and cooled by running tap water. The chemical separation procedure for carrier-free  $^{28}\text{Mg}$  is shown in Fig. 2. The radiochemical purity of  $^{28}\text{Mg}$  was ascertained by measuring the  $\gamma$ -ray spectrum with Ge (Li) detector connected with multichannel pulse-height analyzer. The result is shown in Fig. 3. It shows that the separation of carrier-free  $^{28}\text{Mg}$  and  $^{24}\text{Na}$  is satisfactory.

## 2.2 Diffusion experiment

The Al-Zn-Mg alloys prepared 99.99 mass% Al, 99.999 mass% Zn and 99.9 mass% Mg using a high-frequency induction furnace and cast into an iron mold. The ingots were finally

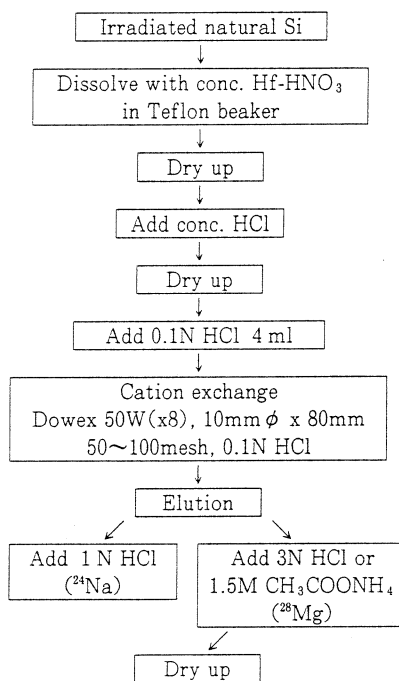


Fig. 2 Flow chart of production process of carrier-free  $^{28}\text{Mg}$  from irradiated Si.

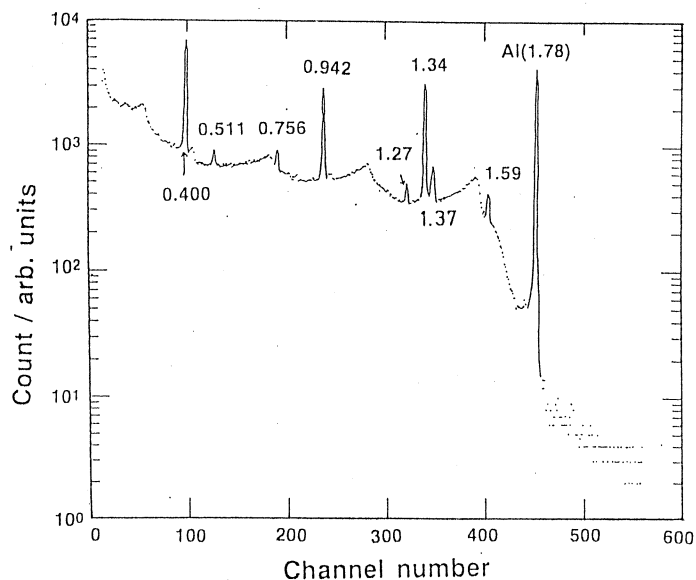


Fig. 3  $\gamma$  ray spectrum of  $^{28}\text{Mg}$  obtained in the present work.

machined into cylinder type specimens with 13 mm in diameter and 13 mm in height. The chemical composition and density are in Table 1.

Table 1 Chemical composition and density of pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys.

MgZn <sub>2</sub> mass%	Zn mass%(at.%)	Mg mass%(at.%)	density kgm <sup>-3</sup>
2	1.89 (0.79)	0.23 (0.26)	2706
4	3.28 (1.38)	0.51 (0.58)	2728
6	5.21 (2.22)	0.80 (0.92)	2754
8	6.50 (2.79)	1.20 (1.38)	2775
10	8.10 (3.50)	1.49 (1.73)	2793
12	10.2 (4.47)	1.87 (2.20)	2828
14	11.4 (5.03)	2.06 (2.45)	2854
16	13.0 (5.79)	2.42 (2.90)	2880
18	14.7 (6.63)	2.65 (3.21)	2907
20	16.6 (7.56)	3.08 (3.73)	2932

The density were determined by measuring the weight and volume. The specimens were annealed at 773 K for  $1.3 \times 10^6$  s in order to homogenize the composition and make grain growth. The resultant grain size of the specimens was about 2 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.  $^{28}\text{Mg}$  in the form of chloride was dried on 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 quartz tube containing about 27 kPa of high purity He gas at 293 K and a small amount of Mg tips to avoid evaporation of  $^{28}\text{Mg}$ . The diffusion annealing was carried out at  $\alpha$ -phase region, according to the phase diagram in Fig. 1. After the diffusion anneal, the cylindrical surface and the bottom of the specimens were reduced by a depth of about 1 mm using a precision lathe. This procedure eliminated the possible effects of surface diffusion and evaporation of  $^{28}\text{Mg}$  from the deposited layer. Each specimen was analyzed by the residual activity technique whereby thin layers from the specimen surface were removed successively 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 multi-channel pulse-height analyzer were used. The channel width of the latter was adjusted to count the  $\gamma$ -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

$$\begin{aligned} \mu I - dI_n/dX_n &= k_1 \cdot C(X_n) \\ &= k_2 \cdot \exp(-X_n^2/4Dt) \end{aligned} \quad (1)$$

where  $\mu$  is the linear absorption coefficient of the  $\gamma$ -radiation of  $^{28}\text{Mg}$  in Al-Mg-Si alloys in  $\text{m}^{-1}$ ,  $I_n$  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.  $D$  is the diffusivity in  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$  and  $t$  is the diffusion time in seconds. The value of  $\mu$  for the energy of the  $\gamma$ -radiation used in the present work was calculated using the values of  $\mu$  for pure metals<sup>5)</sup> and the composition of the Al-Zn-Mg alloys. It is found that the term of  $\mu I_n$  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

Log  $(-dI_n/dX_n)$  vs.  $X_n^2$  by Eq. 1. Fig. 4 shows the typical plots of  $I_n$  vs.  $X_n$  for each composition. Fig. 5 shows the typical plots of  $C(X_n)$  vs.  $X_n^2$  for each composition. Fig. 6 shows the dependence of the tracer diffusion coefficients on  $\text{MgZn}_2$  concentration in the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys, in comparison with self-diffusion coefficients of aluminum<sup>6)</sup> and the impurity diffusion coefficients of Mg in aluminum<sup>7-9)</sup>. The tracer diffusion coefficients of <sup>28</sup>Mg in the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys increase with  $\text{MgZn}_2$  concentration.

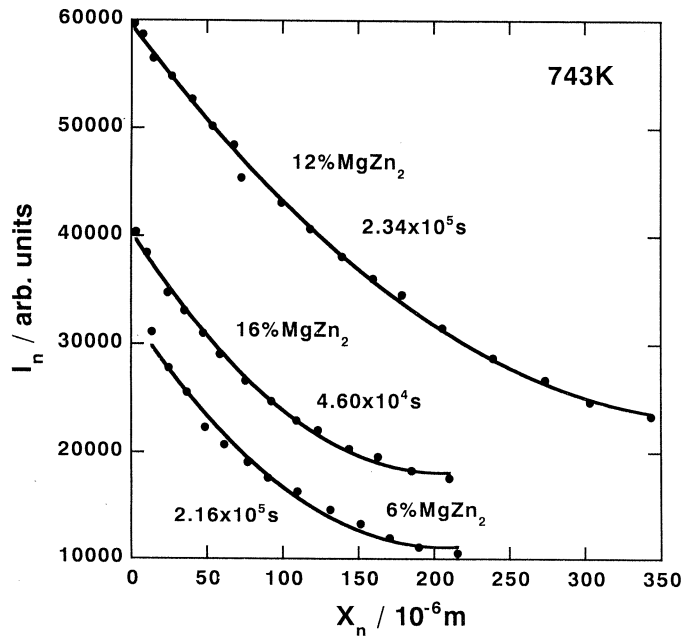


Fig. 4 Typical  $I_n$  vs.  $X_n^2$  plots for diffusion of <sup>28</sup>Mg in Al- MgZn<sub>2</sub> alloys.

#### § 4 . Conclusions

The tracer diffusion coefficients of <sup>28</sup>Mg in the region of  $\alpha$ -solid solution of the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys were determined using the residual activity method. The dependence of the tracer diffusion coefficients of <sup>28</sup>Mg on  $\text{MgZn}_2$  concentration was clearly observed in the pseudo-binary Al-MgZn<sub>2</sub> alloys.



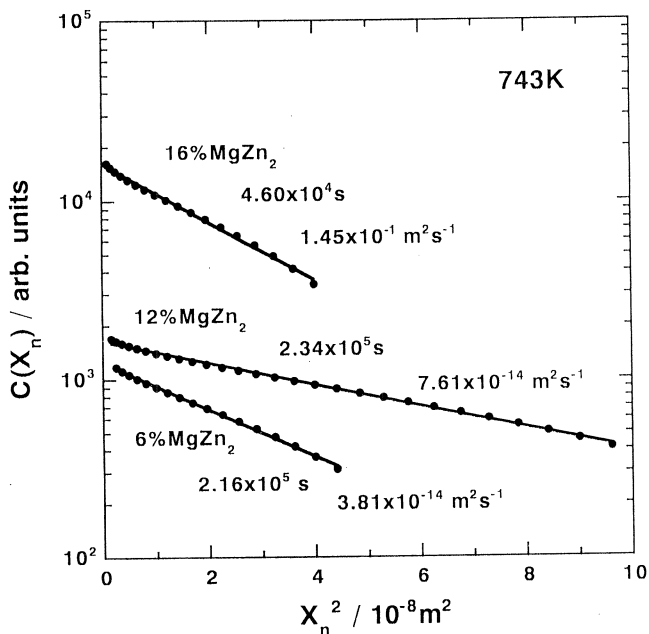


Fig. 5 Typical  $C(X_n)$  vs.  $X_n^2$  plots for diffusion of  $^{28}\text{Mg}$  in Al-MgZn<sub>2</sub> alloys.

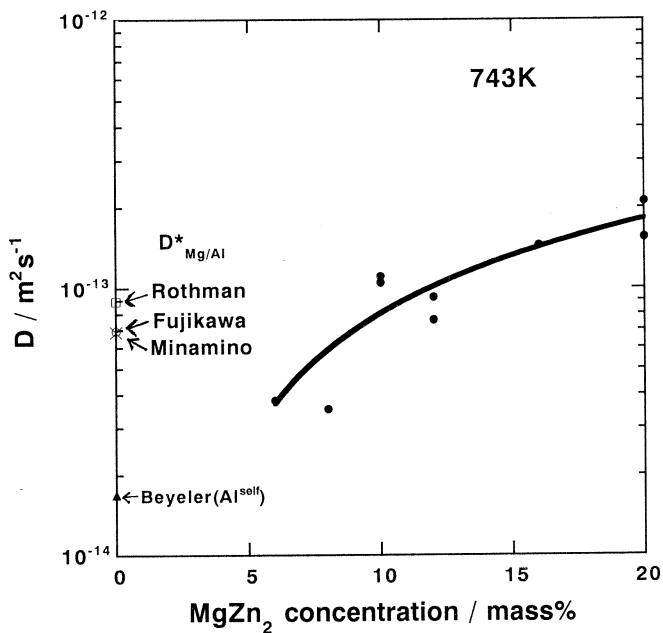


Fig. 6 Concentration dependence of tracer diffusivity of  $^{28}\text{Mg}$  in Al-MgZn<sub>2</sub> alloys, in comparison with those for impurity diffusion of Mg and self-diffusion in aluminum.

### Acknowledgments

The author is grateful to Dr. K. Asano of Kobe Steel Co. for the preparation and chemical analysis of the specimens. The author is grateful to members of the Linac group and radio isotope group at the Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, for the irradiation facilities.

### References

- 1) S. -I. Fujikawa and K. -I. Hirano: *Trans. JIM* **17** (1976) 809.
- 2) S. -I. Fujikawa: *Defect and Diffusion Forum* **143-147** (1997) 403.
- 3) L. F. Mondolfo: *Met. Rev. No. 153*, 1971, p. 95
- 4) M. Yagi, A. Yamadera, S. Fujikawa and T. Shiokawa: *Int. J. Appl. Rad. Isot.* **26** (1975) 637.
- 5) A. L. Conner, H. F. Atwater and E. H. Plassmann: *Phys. Rev.* **A1**, (1970) 539.
- 6) M. Beyler and Y. Adda: *J. Phys. (Paris)* **29** (1968) 345.
- 7) S. -I. Fujikawa and Y. Takada: *Defect and Diffusion Forum* **143-147** (1997) 409.
- 8) S. J. Rothman, N. L. Peterson, L. J. Nowicki and L. C. Robinson: *Phys. Stat. Sol. (b)*, **63** (1974) K29.
- 9) Y. Minamino, T. Yamane, A. Shimomura, M. Shimada, M. Koizumi, N. Ogawa, T. Takahashi and H. Kimura: *J. Mat. Sci.* **18** (1983) 2679.

# 水生無セキツイ動物の光量子放射化分析

## I. 節足動物甲殻類

石巻専修大理工学部

福島美智子・玉手英利

### § 1. 序

海洋に生息する軟体動物のいくつかの種類については、それらの個体に特定の元素を濃縮することが知られている。しかし、元素をとりこむメカニズムやそれら濃縮された元素の体内での役割はほとんど明らかにされていない。また、実際に生息している多種の軟体動物も同様に元素を濃縮する特質があるかどうかは興味深い点である。さらに、海水中の微量元素を分析する際に、多くの分析法にとってマクロ成分である Na, Mg, Cl などが妨害になり、目的元素の分析を困難にする。さらに、漁場の環境という見方をすると、近海の底質中の有機物や元素濃度は重要な意味を持つ。しかし、近海といえども、底質の採取は一般的に楽な操作ではない。ある種の軟体動物中の元素濃度がそれらの生育環境を反響しているのであれば、そのような種類の軟体動物を環境の指標に用いることができる。そこで、現在のところほとんど元素濃度が得られていない海洋の軟体動物について、光量子放射化分析法で微量元素を定量した。

今回は底質の環境を強く反映していると思われる甲殻類に含まれる元素を分析した。試料は、宮城県雄勝湾のシャコ、秋田県男鹿半島近海のガザミ、沖縄県イセエビ、ノコギリガザミであり、それらの筋肉、エラ、頭胸部、臓器にふくまれる15元素を定量した。

### § 2. 実験

#### 2.1 試料

ガザミ、ノコギリガザミはオートクレーブで115°C、10分間処理したのちに第一歩脚内部の筋肉、エラを取った。シャコは殻をはずしたのちに頭胸部と腹部筋を取った。イセエビについては殻をはずしたのちに頭胸部をエラとそれ以外の臓器部分に分離し、腹部筋の一部も試料にした。それら試料を凍結乾燥し、シャコの頭胸部とイセエビのエラはそのまま照射試料にした。それ以外のものについては、ミルで粉末にしたのち200meshのステンレス製ふるいでふるい分けた。個体数、試料重量、乾燥重量と湿重量の比を第1表に示す。

第1表 分析に用いた試料。

部位	生物種	試料数	試料湿重量 (g)	乾燥重量/湿重量
エラ	ガザミ	4	11~19	0.11±0.01
	ノコギリガザミ	4	12~15	0.11±0.01
	イセエビ	3	2.4~3.9	0.08±0.01
脚部筋	ガザミ	7	5~19	0.18±0.01
	ノコギリガザミ	4	23~32	0.19±0.01
腹部筋	シャコ	5	4~10	0.34±0.05
	イセエビ	3		0.20±0.03
頭胸部	シャコ	4	0.5~0.8	0.29±0.07
臓器	イセエビ	3	26~42	0.20±0.02

## 2.2 照射試料

2.1の用に作成した分析試料と比較標準試料100~300mgを高純度アルミニウム箔に包み、直径10mm厚さ2~4mmのディスク状に成型した。これらの照射試料を照射用石英管に封じこんだ。比較的標準試料としてはNIST SRM-1566a Oyster TissueとNRCC TORT-1 Lobsterの2種類を用いた。

## 2.3 照射および放射線測定

照射は東北大学理学部原子核理学研究施設の電子線型加速器を用いて3時間行なった。照射後の試料を新しいアルミニウム箔で包みなおし、適切な冷却時間後に波高分析器付き高純度ゲルマニウム検出器で $\gamma$ 線を測定した。定量に用いた $\gamma$ 線を第2表に示す。

## § 3. 結果と考察

### 3.1 分析試料

今回の実験での分析試料作成に関する値を第1表に示した。これより、各部位の乾燥重量と湿重量の比の平均値は、3種類の生物種のエラについて0.08~0.11、筋肉についてはシャコを除く3種類の生物種について0.18~0.20とほぼ一定値になった。このような傾向は、近い生物



種で部位が同じであれば、構成組織も似ていることを示していると思われる。またシャコの筋肉の乾燥重量／湿重量の値0.34が他の生物種と大きく異なる点から、筋肉組織の質的な違いが推測される。

第2表 元素の定量に用いた核種。

Element	Product Nuclide	Half Life	Gamma-ray used(keV)
As	As-74	17.78d	595.9, 634.8
Ca	K-43	22.3h	617.8
Cr	Cr-51	27.704d	320.1
Cu	Cu-61	3.41h	656
Fe	Mn-56	2.579h	846.8
I	I-126	13.0d	388.6, 666.3
Mg	Na-24	15.02h	1368.6
Mn	Mn-54	312.2d	834.8
Mo	Mo-99	66h	140.5
Na	Na-22	2.602y	1274.6
Ni	Ni-57	36h	1377.6
Pb	Pb-203	2.169d	279.3
Rb	Rb-84	32.9d	881.6
Sr	Sr-87m	2.8h	388.4
Zn	Cu-67	2.58d	184.6

### 3.2 比較標準試料の分析

比較標準試料に用いた2種類の標準物質について、たがいに分析した結果をそれらの公定値とともに第3表に示す。公定値および参考値と本実験結果を比較すると、NIST SRM-1566a Oyster TissueのCr, Mn, Zn, NRCC TORT-1 LobsterのMn以外の値はよく一致し、さらにそれらの大部分のものについては十分によい精度で得られた。また、公定値および参考値の得られていないNIST SRM-1566a Oyster TissueのMo, NRCC TORT-1 LobsterのIとRbについての分析値を得ることができた。さらに、本分析法における定量下限をバックグラウンドの3 $\sigma$ を与える濃度( $\mu\text{g/g}$ )で示してある。

第3表 比較標準試料の分析値 ( $\mu\text{g/g}$  D.W.)。

	NIST SRM-1566a	Oyster Tissue		NRCC TORT-1	Lobster		Detection Limits ( $\mu\text{g/g}$ )
	Certified Value	This Work	n	Certified Value	This Work	n	
As	14.0 $\pm$ 1.2	12.8 $\pm$ 1.4	16	24.6 $\pm$ 2.2	27.0 $\pm$ 3.5	16	1.6
Ca	1960 $\pm$ 190	2110 $\pm$ 150	16	8950 $\pm$ 580	8500 $\pm$ 480	12	51
Cr	1.43 $\pm$ 0.46	0.7 $\pm$ 1.0	8	2.4 $\pm$ 0.6	2.4 $\pm$ 2.0	4	4.1
Cu	66.3 $\pm$ 4.3	70.5 $\pm$ 46.8	12	439 $\pm$ 22	430 $\pm$ 54	4	47
Fe	539 $\pm$ 15	476 $\pm$ 49	12	186 $\pm$ 11	214 $\pm$ 34	12	57
I	4.46 $\pm$ 0.42				23.9 $\pm$ 1.6	12	0.6
Mg	1180 $\pm$ 170	1100 $\pm$ 20	12	2550 $\pm$ 250	2750 $\pm$ 70	12	5.8
Mn	12.3 $\pm$ 1.5	17.3 $\pm$ 3.5	12	23.4 $\pm$ 1.0	16.0 $\pm$ 2.2	8	2.6
Mo		1.3 $\pm$ 1.7	4	1.5 $\pm$ 0.3			
Na	4170 $\pm$ 130	4240 $\pm$ 180	12	36700 $\pm$ 2000	34400 $\pm$ 8600	16	85
Ni	2.25 $\pm$ 0.44			2.3 $\pm$ 0.3	1.8 $\pm$ 1.4	12	3.3
Pb	0.371 $\pm$ 0.014			10.4 $\pm$ 2.0			4.0
Rb	3*				3.3 $\pm$ 1.8	16	0.9
Sr	11.1 $\pm$ 1.0	12.2 $\pm$ 1.1	12	113 $\pm$ 5	109 $\pm$ 20	16	0.6
Zn	830 $\pm$ 57	749 $\pm$ 49	8	177 $\pm$ 10	199 $\pm$ 18	12	31

\* noncertified concentration

### 3.3 試料の均一性と粒径による差異

分析試料に均一性をもたせるために、試料粉末を200meshのふるいで分別した。そこで粒径が200meshの大小で元素濃度に差異があるかどうかを各試料についてしらべた。その一例としてガザミのエラについて得られた結果を第4表に示す。同一試料から各々3試料の抽出により、元素濃度は乾燥重量を基準にしている。3試料についての元素濃度の相対標準偏差10%を均一性の基準にすると、 $<200\text{mesh}$ および $200\text{mesh}<$ についてAs, Cu, Pb, Rb, Znは試料内で不均一であることになる。他の元素については均一性は非常によい。ただし、検出下限以下の濃度であったCrおよびNiを除く。しかし、同一の元素についての相対標準偏差より粒径が小さい $200\text{mesh}<$ のほうが均一性がよいと思われる。そこで、実際の分析では $200\text{mesh}$ より小さい粒径の粉末を用いることにした。

また、元素濃度を粒径別にみた場合、第4表の $C_{200\text{mesh}}/C_{<200\text{mesh}}$ （すなわち、粒径 $200\text{mesh}$ 以上の元素濃度平均値/粒径 $200\text{mesh}$ 以下の元素濃度平均値）が $0.5\sim 2$ の範囲内にはいないものは濃度の差異があるとすると、Ca, Cu, Fe, Srの4元素が分布差異を示すことになる。

Ca と Sr は粒径の大きいほうに高濃度で存在することより、エラの基本的な構成元素であるこれら元素は微小な粉末になりきらないことを示していると思われる。このような粒径別の濃度差異を示す元素は、生物種や部位によっても異なった。

第4表 ガザミのエラの粒径別粉末に含まれる元素濃度 ( $\mu\text{g/g}$  D.W.)。

Element	<200mesh (n=3)		200mesh< (n=3)		$C_{200\text{mesh}<}/C_{<200\text{mesh}}$
	Ave $\pm$ SD	RSD(%)	Ave $\pm$ SD	RSD(%)	
As	11.1 $\pm$ 1.5	13.5	17.8 $\pm$ 2.1	11.8	1.60
Ca	63700 $\pm$ 1000	1.6	14300 $\pm$ 300	2.1	0.22
Cr	ND		3.3 $\pm$ 3.2	97.0	
Cu	96.8 $\pm$ 51.2	52.9	362 $\pm$ 132	36.5	3.74
Fe	1700 $\pm$ 110	6.5	3790 $\pm$ 190	5.0	2.23
I	88.6 $\pm$ 1.8	2.0	119 $\pm$ 3	2.5	1.34
Mg	13200 $\pm$ 100	0.8	9060 $\pm$ 110	1.2	0.69
Mn	66.1 $\pm$ 10.8	16.3	78.9 $\pm$ 2.7	3.4	1.19
Na	52300 $\pm$ 2100	4.0	92700 $\pm$ 900	1.0	1.77
Ni	ND*		1.2 $\pm$ 0.4	33.3	
Pb	75.6 $\pm$ 11.2	14.8	50.4 $\pm$ 5.8	11.5	0.67
Rb	3.3 $\pm$ 2.4	72.7	6.0 $\pm$ 1.2	20.0	1.82
Sr	1340 $\pm$ 10	0.7	272 $\pm$ 9	3.3	0.20
Zn	92.8 $\pm$ 159.8	172.2	124 $\pm$ 37	29.8	1.34

\*ND : not detected

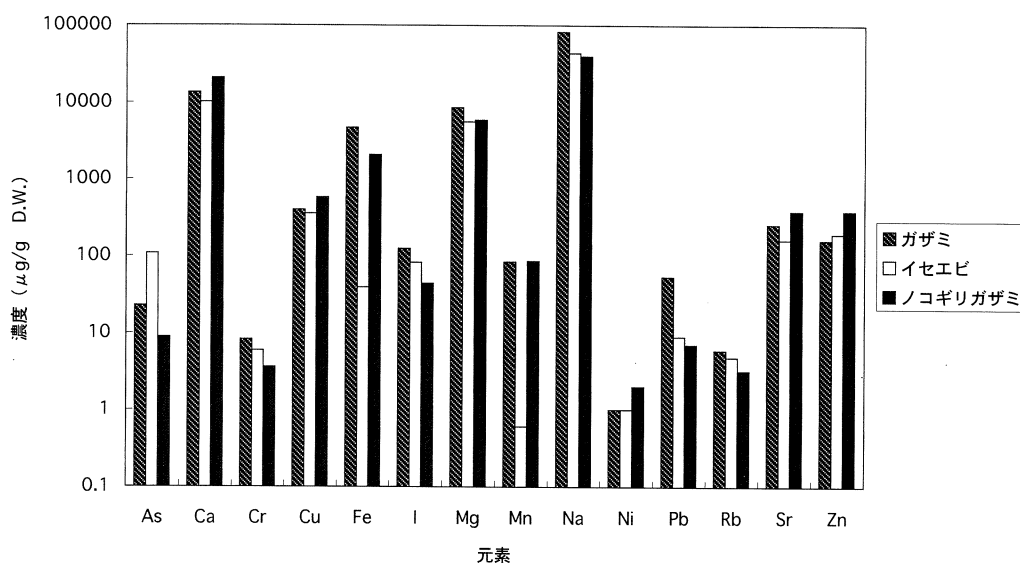
### 3.4 数種類の甲殻類の元素濃度

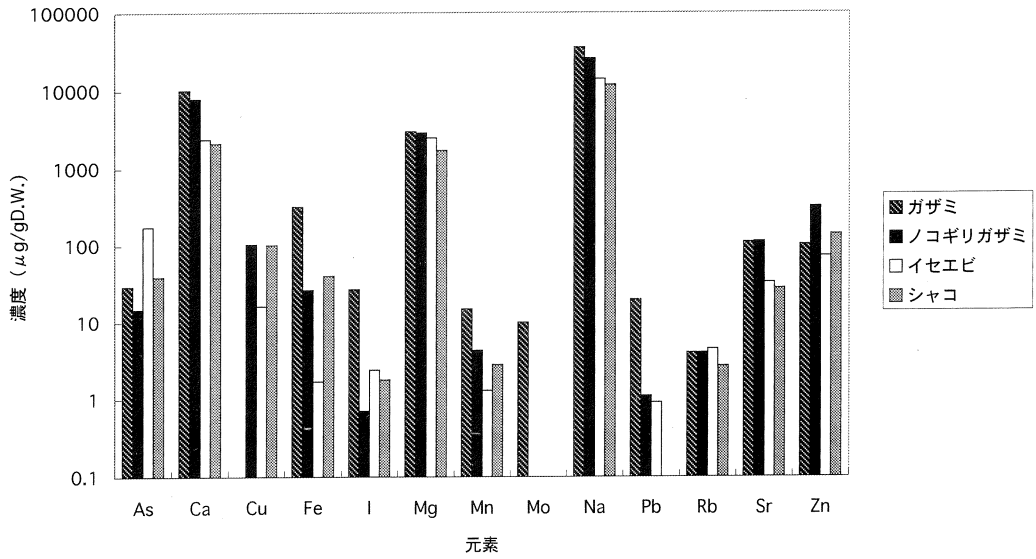
ガザミ、シャコ、イセエビ、ノコギリガザミのエラ、筋肉、頭胸部や臓器に含まれる元素濃度を第5表に示す。参考までに検出下限以下の値も含めてある。濃度は平均値のみであり、乾燥重量を基準にしている。また、第5表の値のうち、エラと筋肉に含まれる元素濃度をグラフに表わしたのが第1図と第2図である。さらに部位ごとの元素濃度をイセエビを例にして第3図にあらわす。第5表より、イセエビのエラ、筋肉、臓器すべてについて、Asの濃度がかなり高い。この傾向が他の地域で採取されたイセエビについてもみられるのか、またイセエビやそれに近い種が選択的にAsを濃縮する傾向があるのかをさらに検討したい。

第1図より、As、Fe、Mn、Pbの4元素以外は生物種による差異は認められない。またFe、Mn、Pbの3元素はガザミのエラに高濃度で検出され、逆にイセエビのエラのFe、Mn濃度は

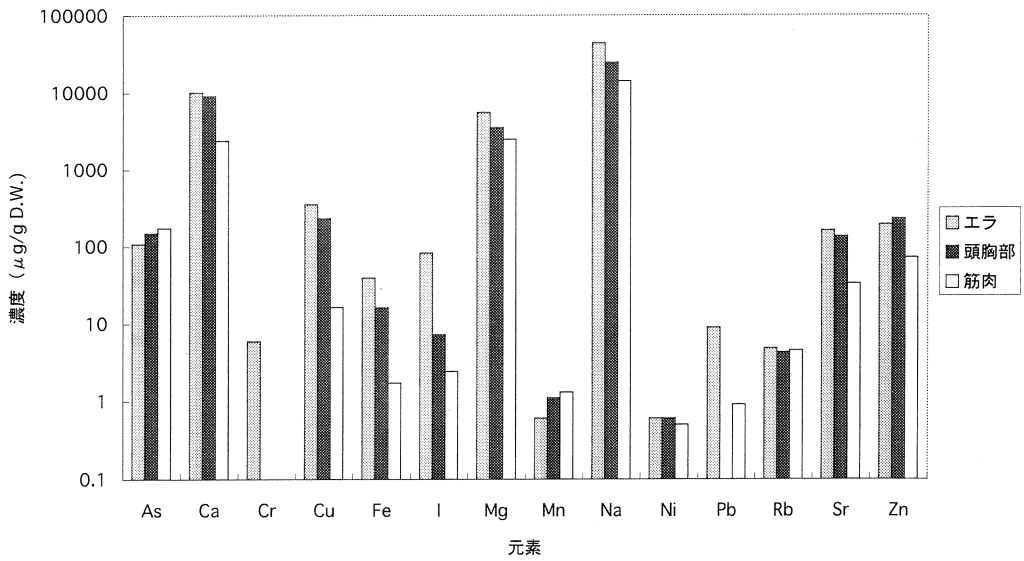
第5表 軟体動物甲殻類に含まれる元素濃度 ( $\mu\text{g/g D.W.}$ )。

元素	エ			筋				頭胸部	臓器 (エラを除く)
	ガザミ (n=4)	イセエビ (n=3)	ノコギリガザミ (n=4)	シャコ (n=5)	ガザミ (n=7)	イセエビ (n=3)	ノコギリガザミ (n=4)	シャコ (n=4)	イセエビ (n=3)
As	22.4	108	8.8	39	29.1	173	14.8	22.8	149
Ca	13300	10100	20700	2110	10100	2380	7830	51000	9060
Cr	8.2	5.9	3.6					1.4	
Cu	398	353	575	101		16.2	103	231	234
Fe	4630	39.1	2070	40.2	315	1.7	26.2	1020	16.1
I	125	81.8	44	1.8	26.8	2.4	0.7	15.4	7.2
Mg	8560	5530	5850	1720	2970	2480	2850	5070	3530
Mn	84.1	0.6	85.7	2.8	14.9	1.3	4.3	79.1	1.1
Mo					9.9				
Na	81900	43400	39600	11800	35300	14000	25500	29700	24400
Ni	0.3	0.6	2	8		0.5	0.9	1.5	0.6
Pb	53.4	8.9	7		19.7	0.9	1.1		
Rb	5.9	4.8	3.2	2.7	4	4.5	4	3.6	4.3
Sr	255	161	381	27.5	109	33	111	830	135
Zn	160	193	380	139	102	71.8	315	332	230

第1図 軟体動物甲殻類のエラに含まれる元素濃度 ( $\mu\text{g/g D.W.}$ )。



第2図 軟体動物甲殻類の筋肉に含まれる元素濃度 (μg/g D.W.)。



第3図 イセエビに含まれる元素濃度 (μg/g D.W.)。



他の生物種に比べてかなり低い値を示した。これが生物種による差異なのか、採取地点の差異によるものかは興味深い点である。第2図より、筋肉中の元素濃度はCa, Mg, Na, Rb, Srの5元素についてはあまり差異は認められないが、そのほかの元素濃度は生物種によってかなり異なっている。また、筋肉に関してもイセエビについてはFe, MnのみならずCu, Pb濃度も他の生物種よりもかなり低い値になっている。これも検討すべき点である。

第3図より、As, Mg, Mn, Na, Ni, Rb以外の元素について、部位ごとに濃度の違いがみとめられた。特に筋肉については元素濃度は他の部位より低い。

以上のことより、光量子放射化分析法で4種類の軟体動物甲殻類のエラ、筋肉、頭胸部や臓器に含まれる15元素を定量することができた。部位によって、また生物種によって元素濃度の差異が認められた。今回と異なる地域で採取された同種の生物や他種の生物について、さらに分析値をもとめていく予定である。

光量子放射化分析にあたり、東北大学理学部原子核理学研究施設の大槻勤博士、ならびにマシングループの方々、職員の方々にお世話になり、感謝します。また、分析試料の集取に関しては宮城県水産研究開発センターの阿部洋士部長および石巻専修大学の菅原義雄教授にはたいへんお世話になり、深く感謝いたします。本研究の一部は財団法人 三菱財団の研究助成金によって行われました。

## 薄膜中の炭素，窒素の非破壊光量子 放射化分析法の検討

NTT 光エレクトロニクス研  
KEK 放射線科学センター\*  
核理研\*\*

鹿野弘二・加藤正明・榎本和義\*  
大槻 勤\*\*

薄膜中の炭素，窒素の非破壊光量子放射化分析法の検討を行った。すなわち， $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$  反応および  $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$  反応に対する妨害核反応，マトリックスからの妨害放射能，大気からの汚染防止法などを検討した。その結果，制動放射線の照射エネルギーを30MeV以下にすることで妨害核反応を無視できること，Si基板から $^{29}\text{Al}$ が生成するが照射20～30min後に測定を開始することで放射能妨害を避けられること，さらに，ヘリウムガス置換で大気からの汚染を抑えることができることを明らかにした。グラファイトおよび窒化ホウ素を標準試料として，炭化ケイ素膜および窒化ケイ素膜中の炭素，窒素を定量した結果，膜中の濃度としてそれぞれ $37.03 \pm 1.28 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  および  $52.97 \pm 2.97 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  を得た。なお，本法の定量限界値は炭素で $0.3 \mu\text{g}$ ，窒素で $3 \mu\text{g}$ であった。また，膜厚分布を測定し，これら薄膜試料が荷電粒子放射化分析用の軽元素標準試料として適用できることを明らかにした。

### § 1. はじめに

半導体材料や高温超伝導材料の研究に見られるように材料の薄膜化が進み，薄膜作製用基板の表面や，作製された薄膜中ならびにその表面の軽元素や遷移金属元素のキャラクタリゼーションの重要性が増大している<sup>1,2)</sup>。

荷電粒子放射化分析法はバルク中の軽元素分析に最適である<sup>3)</sup>。しかし，表面あるいは薄膜の分析には，照射後の表面汚染除去が困難であること，また，比較標準として使用できる軽元素薄膜試料がないことからこれまで適用されなかった。近年，表面，薄膜の軽元素分析を目的とした荷電粒子放射化分析の検討が進められている。すなわち，表面汚染については数 $\mu\text{m}$ の化学エッチング法の開発や照射雰囲気ならびに核反応の選択によりその妨害を抑えることが可能となってきた<sup>4,5)</sup>。一方，軽元素薄膜試料については比較標準としてあるいは正確な励起

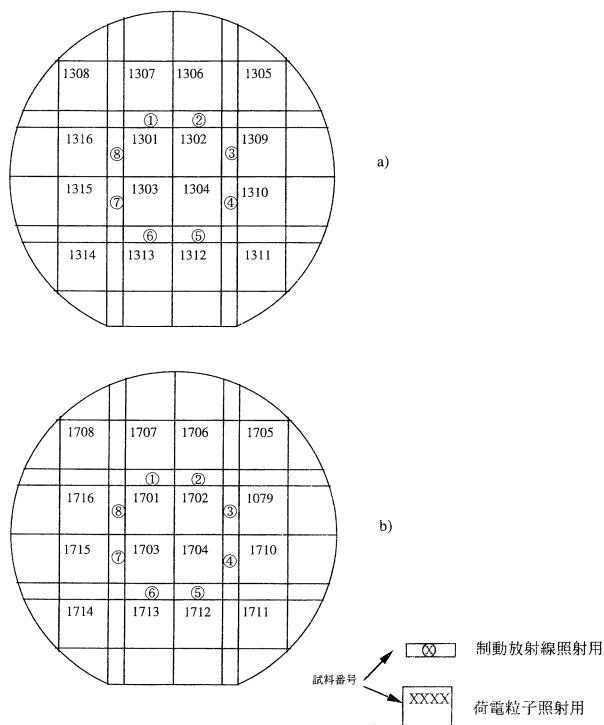
関数の測定用試料として不可欠である<sup>6)</sup>。中性子即発 $\gamma$ 線分析法で濃度を決定したホウ素膜を比較標準として用い、荷電粒子放射化分析による表面、薄膜のホウ素の定量が行われた<sup>7)</sup>。しかしながら、炭素 (C)、窒素 (N)、酸素 (O) 分析の標準として使用できる薄膜試料はこれまで作製されていなかった。

本研究では、荷電粒子放射化分析に用いる薄膜標準試料を作製することを目的として、Si 基板上に形成した炭化ケイ素 (SiC) 膜、窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 膜中の C, N の非破壊光量子放射化分析法の検討を行なった。さらに、薄膜分析のための標準試料としての適用性を評価した。

## § 2. 実 験

### 2.1 試料

分析に用いた薄膜試料は FZ-Si 基板 (100 $\phi$  x 1 mm 厚) 上にマグネトロンスパッタ法で作製した SiC および Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> で、膜厚は約 0.6  $\mu$ m である。これを、第 1 図に示したようにウェハー



第 1 図 分析試料の採取面内位置。

a) SiC, b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

中央付近より切断して分析試料（5 x 5 mm）とした。分析試料は、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  混合液、純水、エチルアルコールの順に数分間超音波洗浄した。Cの比較標準試料には5 x 5 mmに切断した厚さ0.5mmのグラファイト板を、Nの比較標準試料には、5 x 5 mmに切断した厚さ0.5 mmの $\text{Si}_3\text{N}_4$ 焼結体および窒化ホウ素（BN）焼結体または錠剤整形し5 x 5 mmに切断した $\text{NH}_4\text{NO}_3$ の3種類を用いた。

## 2.2 照射

分析試料2枚の薄膜面を重ねて厚さ8  $\mu\text{m}$ のアルミニウム箔に包み照射試料とした。これをアルミニウム箔で包んだ比較標準試料2枚で挟み、さらにアルミニウム箔に包み、石英管（外径10  $\phi$ 、内径9  $\phi$  mm）に挿入した。石英管内を真空にし、ヘリウムガスで置換する操作を繰り返した後、封入した。

制動放射線照射は東北大学理学部附属原子核理学研究施設の電子線加速器により、照射エネルギー25~30MeVで10min行った。

## 2.3 放射能測定

制動放射線照射した試料はアルミニウム箔を取り除き、Ge(Li)検出器-4096ch波高分析装置により所定の時間間隔で繰り返し放射能測定を行い、511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線を求めた。なお、 $^{11}\text{C}$ および $^{13}\text{N}$ の生成放射能は、多重最小二乗法による半減期解析により補正して求めた。

## 2.4 軽元素濃度の算出

軽元素濃度 ( $C_x$ ;  $\text{g/cm}^2$ ) は式(1)より算出した。

$$C_x = (A_x / A_s) (W / S) \quad (1)$$

ここで、 $A_x$ は減衰曲線の半減期解析により求めた $^{11}\text{C}$ または $^{13}\text{N}$ の生成放射能、 $A_s$ は比較標準試料の生成放射能、 $W$ は比較標準試料中の軽元素重量、さらに、 $S$ は事前に求めた分析試料の面積である。

なお、分析試料の面積 ( $S$ ) は以下のようにして測定した。

すなわち、分析試料の薄膜面を複写機により拡大コピーし、これを切り取り、紙片の重量を測定した。同様に5 x 5 mmの図形を同じ倍率で拡大コピーし、切断、秤量し、分析試料の紙片重量と比較することにより面積を算出した。5 x 5 mmの図形を拡大コピーした紙片21枚の

平均重量は $28.43 \pm 0.74 \text{mg}$ であり、相対標準偏差は2.6%であった。

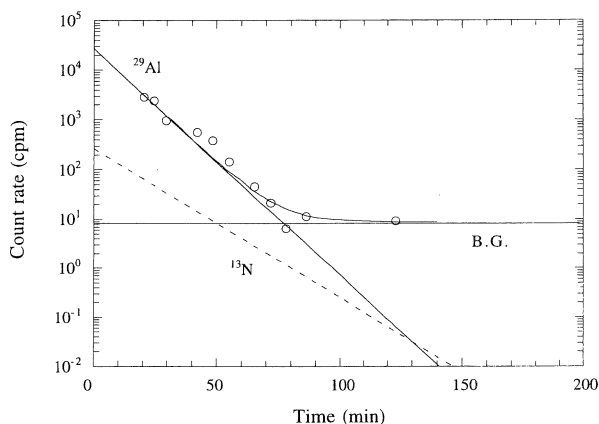
### § 3. 結果と考察

#### 3.1 妨害核反応の検討

光量子放射化分析による炭素、窒素の非破壊分析で妨害となる放射性核種、生成核反応、核的性質を第1表に示す。表より、炭素分析では、窒素、酸素から生成する $^{11}\text{C}$ の妨害が考えられる。窒素からの $^{14}\text{N}(\gamma, p 2n)^{11}\text{C}$ 反応のQ値は $-31.2 \text{MeV}$ であるため照射エネルギーを30 MeV以下にすることで妨害を避けることができる。また、酸素からの妨害は酸化物では問題となるが他の物質では無視できるほど小さいと考えられる<sup>8)</sup>。一方、窒素分析では酸素からの $^{16}\text{O}(\gamma, p 2n)^{13}\text{N}$ 反応による妨害が予想されるが、この反応のQ値が $-33.5 \text{MeV}$ であるため照射エネルギーを30 MeV以下にすることで妨害を避けることが可能となる。また、表より、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ はいずれも陽電子崩壊核種で半減期だけが異なり、共存する場合互いに妨害とな

第1表 炭素、窒素の核反応および妨害核反応。

Nuclear reaction	Half-life (min)	Decay mode	$E_{\gamma}$ , % (keV)	Q-value (MeV)
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	20.38	$\beta^+$	511, 200	-18.7
$^{14}\text{N}(\gamma, p 2n)^{11}\text{C}$	20.38	$\beta^+$	511, 200	-31.2
$^{16}\text{O}(\gamma, \alpha n)^{11}\text{C}$	20.38	$\beta^+$	511, 200	-25.9
$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	9.96	$\beta^+$	511, 200	-10.6
$^{16}\text{O}(\gamma, p 2n)^{13}\text{N}$	9.96	$\beta^+$	511, 200	-33.5
$^{30}\text{Si}(\gamma, p)^{29}\text{Al}$	6.6	$\beta^-$	1273, 89.1	-13.5

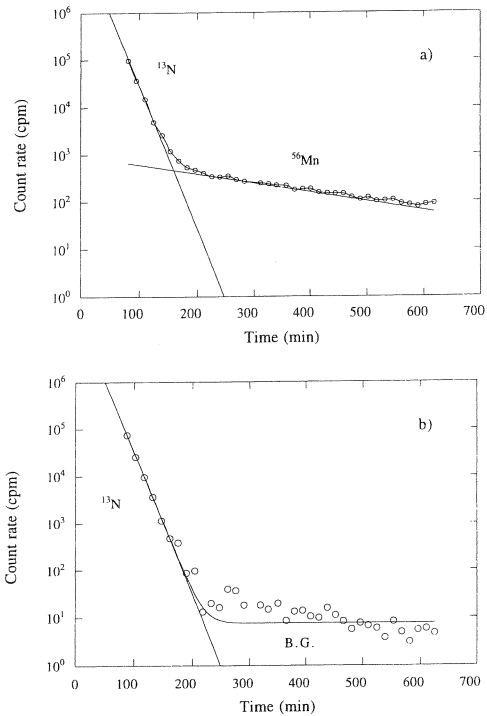


第2図 Si基板から得られた511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線。

るため、減衰曲線の半減期解析から生成放射能を算出する必要がある。さらに、マトリックスのSiからは $^{29}\text{Al}$ が生成し、放射能測定妨害となり得ることが推定された。そこで、薄膜の基板に用いたFZ-Siを照射し、511keV  $\gamma$ 線の経時変化を測定し、マトリックスからの妨害の程度、石英管封入時のヘリウムガス置換の効果を検討した。第2図に制動放射線照射したSiからの511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線を示す。測定は検出器直前で行うと仮定し、照射終了直後は放射能強度が大きいため検出器から離し、放射能の減衰に対応して検出器に近づけて測定し、幾何効率を補正して減衰曲線を求めた。図より、511keV  $\gamma$ 線は半減期6.6minで減衰することが分かる。 $\gamma$ 線スペクトルでは $^{29}\text{Al}$ からの1273keV  $\gamma$ 線に加え、750keV付近にも $\gamma$ 線が測定された。これは、1273keV  $\gamma$ 線のシングルエスケープピークと考えられ、したがって、図の511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線は $^{29}\text{Al}$ から放出された $\gamma$ 線の電子対生成によることが明らかとなった。図には参考のため $^{13}\text{N}$ の減衰曲線も点線で示した。以上の結果から、ガス置換により大気中の炭素、窒素の汚染の防ぐことができること、Si基板中の不純物炭素、窒素からの妨害は無視できること、また、 $^{29}\text{Al}$ からの妨害が無視できる20~30min後に測定を開始した方がよいことが分かった。

### 3.2 窒素比較標準試料の選択

$\text{NH}_4\text{NO}_3$ は、169.6°Cで融解し、約210°Cで分解する<sup>9)</sup>ため、石英管封入の際の加熱により、一部融解、分解し、分析試料を汚染することが明らかとなった。そこで、融点の高い窒素化合物として $\text{Si}_3\text{N}_4$ 焼結体とBN焼結体を選択し、減衰曲線を測定した。結果を第3図に示す。図より、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ の減衰曲線は $^{13}\text{N}$ に加え、半減期2~3時間の長半減期成分が測定された。 $\gamma$ 線スペクトルより、 $^{56}\text{Mn}$  ( $\beta^-$ , 半減期2.58hr)が生成することが分かり、 $^{56}\text{Mn}$ から放出される $\gamma$ 線の電子対生成による



第3図 窒素標準試料から得られた511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線。

a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , b) BN

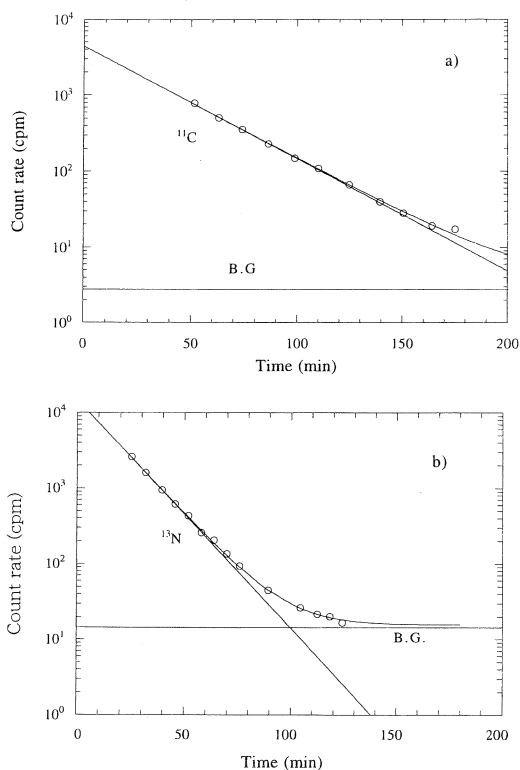


ものと判明した。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>には焼結助材として鉄が添加されており、<sup>57</sup>Fe(γ, p)反応により<sup>56</sup>Mnが生成したと考えられる。一方、BNから得られた減衰曲線は<sup>13</sup>Nの半減期のみを示し、妨害のないことが分かった。また、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BNいずれの含有窒素に対する<sup>13</sup>N生成量は一致したが、比較標準試料には<sup>56</sup>Mnの妨害のないBNを使用することとした。

### 3.3 薄膜中の炭素、窒素の定量

第4図に制動放射線照射したSiC膜、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜から得られた511keV γ線の減衰曲線を示す。<sup>29</sup>Alの生成放射能が大きいため測定は照射終了25~50min後に検出器から5cm程度離れた位置で行った。図より、SiC膜の減衰曲線の半減期は<sup>11</sup>Cに一致し、また、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜の減衰曲線の半減期は<sup>13</sup>Nに一致することが分かった。また、他の長半減期成分の生成は認められなかった。

第2表にSiC膜、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜中の炭素、窒素の定量結果を示す。表より、炭素分析値は18~25 μgであり、単位面積あたりの濃度は平均37.03 ±



第4図 薄膜から得られた511keV γ線の減衰曲線。  
a) SiC膜, b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜

第2表 SiC膜およびSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜中の炭素、窒素の定量結果。

Sample	Analytical result (μg)	Area (cm <sup>2</sup> )	Concentration (μg/cm <sup>2</sup> )	Average value (μg/cm <sup>2</sup> )
SiC- 1	19.5	0.531	36.7 ± 0.6 *	
SiC- 2	24.5	0.688	35.6 ± 0.5	
SiC- 3	20.9	0.541	38.7 ± 0.5	
SiC- 4	18.2	0.589	37.1 ± 0.3	37.03 ± 1.28
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 2	27.8	0.554	50.2 ± 3.5	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 3	28.1	0.501	56.1 ± 0.7	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - 4	21.6	0.411	52.6 ± 1.6	52.97 ± 2.97

\*放射能計数誤差

$1.28 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 相対偏差3.5%であることが分かった。一方, 窒素の分析値は22~28  $\mu\text{g}$  であり, 平均濃度は $52.97 \pm 2.97 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 相対偏差5.6%であった。

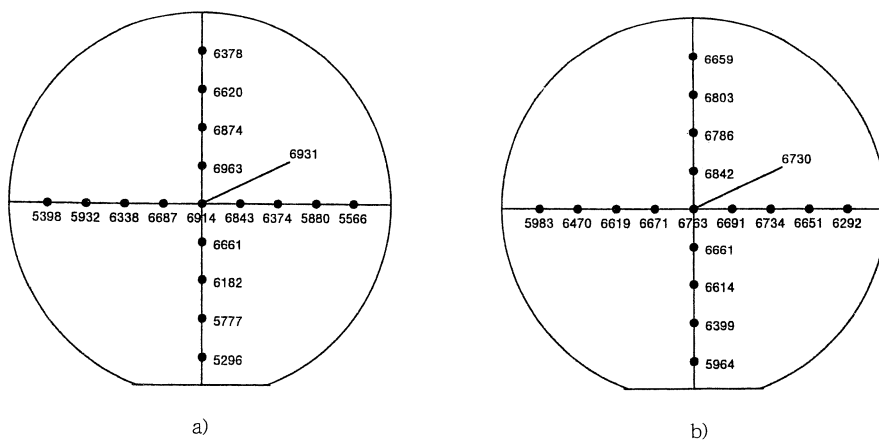
なお, 照射終了30min後に測定を開始するとして自然計数の標準偏差の3倍を検出限界とすると本法の定量限界は, 炭素で0.3  $\mu\text{g}$ , 窒素で3  $\mu\text{g}$  であった。

### 3.4 標準試料への適用性

薄膜試料の膜厚分布を測定し, 均一性を評価することは, 比較標準試料として使用する場合に重要な課題である。そこで, 同一条件で作製したSiC膜,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜の膜厚を表面粗さ計で測定した。第5図に測定結果を示す。図より, SiC膜および $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜の平均膜厚はそれぞれ $0.631 \pm 0.082 \mu\text{m}$ と $0.657 \pm 0.044 \mu\text{m}$ であり, 相対偏差はそれぞれの13%と6.7%であった。ところで, 表面粗さ計による膜厚の面内分布評価は, 同一条件で作製した膜の一部を化学エッチングなどで除去して測るため, 試料の再利用は不可能であり評価法として適しているとは思われない。これに対し, 薄膜試料に荷電粒子照射し, 生成放射能を比較することで膜厚の面内分布を非破壊で評価できる。またこの方法は, 放射能減衰後, 試料を繰り返し利用できるため, 標準試料の均一性評価には最適と思われる。第6図は,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜に $\alpha$ を照射し,  $^{15}\text{N}(\alpha, n)^{18}\text{F}$ 反応で生成した $^{18}\text{F}$ 生成量の面内分布を示したものである。 $\alpha$ 粒子照射はNTTのサイクロトロンを用いて行った。水冷した照射ホルダーに試料を装着し, 真空( $<10^{-4}$  torr)中で16MeVの $\alpha$ 粒子を $0.5 \mu\text{A}$ , 5 min照射した。放射能測定は一對の $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) 検出器からなる同時計数装置により行った。第6図より,  $^{18}\text{F}$ 生成量は $9.2\text{cps}/\mu\text{A}$ ~ $12.0\text{cps}/\mu\text{A}$ であり, 平均生成放射能は $10.7 \pm 0.6\text{cps}/\mu\text{A}$ であった。相対標準偏差は5.6%であり, 第5図で示した $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜厚の標準偏差とはほぼ一致することが分かり, いずれの膜厚評価法でも同程度の精度で測定できることが明らかとなった。

以上の結果から, これらの薄膜を比較標準に用いた場合, 炭素, 窒素はそれぞれ精度13%ならびに7%で分析可能であると予想された。

ところで, 第5図で得られた平均膜厚とそれぞれの密度<sup>10,11)</sup> ( $3.2\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $3.185\text{g}/\text{cm}^3$ ) から算出した炭素および窒素濃度はそれぞれ $66.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $83.7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ であり, いずれも第2表に示した定量結果より大きいことが分かった。これは, 薄膜の密度が変化しているためと思われる, 膜厚とバルク試料の密度から軽元素濃度を推測できないことを示すものである。したがって, 放射化分析で濃度を明らかにした薄膜試料を標準物質に使用することは重要と考えられる。



第5図 SiC膜,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜の膜厚面内分布。

a) SiC膜

横方向平均値 :  $0.622 \pm 0.076 \mu\text{m}$

縦方向平均値 :  $0.641 \pm 0.083 \mu\text{m}$

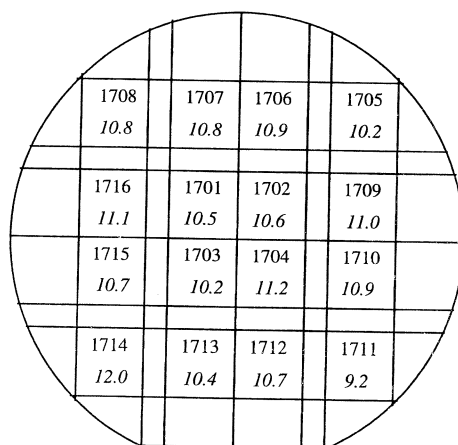
面内分布 :  $0.631 \pm 0.082 \mu\text{m}$

b)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜

横方向平均値 :  $0.654 \pm 0.039 \mu\text{m}$

縦方向平均値 :  $0.661 \pm 0.083 \mu\text{m}$

面内分布 :  $0.631 \pm 0.044 \mu\text{m}$



第6図  $^{15}\text{N}(\alpha, n)^{18}\text{F}$ 反応で生成した $^{18}\text{F}$ 生成量分布。

XXXX	←	試料番号
YYY	←	$^{18}\text{F}$ 生成量 (cps/ $\mu\text{A}$ )

平均値 $10.7 \pm 0.6$  (cps/ $\mu\text{A}$ )

#### § 4. ま と め

荷電粒子放射化分析用の軽元素薄膜標準試料を作製する目的で、FZ-Si 基板上に作製した SiC 膜および Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜中の炭素、窒素の非破壊光量子放射化分析法を検討し、以下の結果を得た。

1) <sup>12</sup>C( $\gamma$ , n) <sup>11</sup>C( $\beta^+$ , 半減期20.38min) 反応および <sup>14</sup>N( $\gamma$ , n) <sup>13</sup>N( $\beta^+$ , 9.96min) 反応に対する妨害核反応を検討し、照射エネルギーが30MeV 以下であれば共存元素からの妨害なく炭素、窒素の光量子放射化分析が可能なることを明らかにした。また、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N はいずれも陽電子崩壊核種であり、お互いに放射能測定妨害となるため、減衰曲線を測定し、半減期解析から正確な生成放射能を測定しなければならないことが分かった。

2) マトリックスの Si からの放射能妨害を検討し、<sup>29</sup>Al が生成する可能性のあることが分かった。そこで、制動放射線照射した FZ-Si からの511keV  $\gamma$  線の減衰曲線を求め、半減期解析した結果、半減期が6.6min で減衰し、<sup>29</sup>Al の電子対生成によることが分かった。また、分析試料の封入にあたってヘリウムガス置換することにより、大気中の炭素、窒素の妨害を無視できることが分かった。

3) 窒素の比較標準試料に Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BN を選択し、制動放射線照射を行い、減衰曲線から比較標準試料の可能性を検討した。その結果、いずれも含有窒素に対する<sup>13</sup>N 生成量は一致したが、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> では焼結助材として含まれる Fe から生成する<sup>56</sup>Mn( $\beta^-$ , 半減期2.58hr) の妨害があった。そこで、BN を窒素標準試料として使用することとした。

4) グラファイト、BN を標準試料に、SiC 膜、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜の炭素、窒素の定量を行った。SiC 膜、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜から得られた511keV  $\gamma$  線の減衰曲線は半減期がそれぞれ20.38min と9.96min を示し、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N のみが測定された。4 試料に対する炭素の分析値は18~25  $\mu\text{g}$  であり、単位面積あたりの濃度は平均37.03 $\pm$ 1.28  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった。一方、3 試料に対する窒素分析値は22~28  $\mu\text{g}$  であり、濃度は52.97 $\pm$ 2.97  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった。

5) 本分析法における定量限界は、照射終了30min 後に測定を開始するとして自然計数の標準偏差の3 倍を検出限界とすると炭素で0.3  $\mu\text{g}$ 、窒素で3  $\mu\text{g}$  であった。

6) 軽元素濃度を定量した薄膜の標準試料への適用性を明らかにする目的で膜厚の均一性を測定した。表面粗さ計で測定した膜厚の面内分布は SiC 膜で0.631  $\mu\text{m}$  ( $\pm$ 13%)、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜で0.657  $\mu\text{m}$  ( $\pm$ 6.7%) であった。また、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜については16MeV の  $\alpha$  照射を行い、<sup>15</sup>N から生成する<sup>18</sup>F の生成量を比較した。その結果、16試料の平均値は10.7cps/ $\mu\text{A}$  ( $\pm$ 5.6%) であり、相対標準偏差は膜厚の場合とほぼ一致した。したがって、この薄膜を標準とした場合、分析精度は炭素で13%、窒素で7%程度と予想された。

7) 表面粗さ計で測定した膜厚とバルクの密度から膜中の軽元素濃度を算出した結果、炭素、窒素とも定量値よりも大きいことが明らかとなった。これは、薄膜密度がバルクと異なり小さいためと推察され、膜厚とバルク試料の密度から軽元素濃度を算出することは困難であることを明らかとした。

本研究を進めるにあたり、薄膜の作製および膜厚の測定をしていただいた NTT-AT 材料開発&分析センタ新素材開発部竹中久貴氏にお礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) 高萩隆行 : 応用物理 **166** (1997) 1311.
- 2) 池田聡, 内田英次, 富永之廣, 平下紀夫 : 応用物理 **166** (1997) 1326.
- 3) K. Shikano, H. Yonezawa and T. Shigematsu : J. Radioanal. Nucl. Chem. **167** (1993) 81.
- 4) M. A. Misdag, G. Blondiaux, J. P. Andre, M. Hage Ali, M. Valladon, C. J. Maggiore and J. L. Debrun : Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. **B15** (1986) 328.
- 5) S. Kataoka, Y. Tarumi, S. Tomiyoshi and T. Nozaki : J. Radioanal. Nucl. Chem. **216** (1997) 217.
- 6) H. Yonezawa, K. Shikano and T. Shigematsu : J. Radioanal. Nucl. Chem. **217** (1997) 289.
- 7) H. Yonezawa, C. Yonezawa and T. Shigematsu : J. Radioanal. Nucl. Chem. **198** (1995) 125.
- 8) 榎本和義 : 私信.
- 9) N. L. Ross Kane, *Inorganic and Theoretical Chemistry*, ed. J. W. Mellor (Longmans, London, 1964) Vol. 8, Suppl. 1, Nitrogen (Part 1) p. 521.
- 10) 日本化学会編 : 「化学便覧 応用化学編Ⅱ 材料編」(丸善, 1986) p. 959.
- 11) 久保, 長倉, 井口, 江沢編 : 「岩波 理化学辞典」第4版(岩波書店, 1987) p. 786.

## Formation of Radioactive Hetero-Fullerenes

T. Ohtsuki, K. Masumoto<sup>1</sup>, K. Sueki<sup>1</sup>, K. Shikano<sup>3</sup>, T. Shigematsu<sup>3</sup>

*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Mikamine,*

*Taihaku, Sendai 982, Japan*

<sup>1</sup>*Radiation Science Center, KEK, Tanashi, Tokyo 188, Japan*

<sup>2</sup>*Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University,*

*Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-03, Japan*

<sup>3</sup>*NTT Opto-electronics Laboratories, Tokai, Ibaraki, 319-11, Japan*

Fullerenes, C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub>, were irradiated by 8 and 10 MeV deuterons. The irradiated samples were dissolved in CS<sub>2</sub> and filtered to remove insoluble by-products. Finally, radioactive fullerenes and products, such as fullerene dimers, trimers labeled with <sup>13</sup>N, were isolated and detected in the liquid phase by radiochromatography. This suggests that the energy rich <sup>13</sup>N atoms successfully incorporated into the fullerene cages and that the disrupted cages reacted with neighboring cages.

### § 1. Introduction

Since the discovery of fullerene<sup>1)</sup> and by the development of methods to produce large amount of fullerenes<sup>2-4)</sup>, many workers have been attracted to fullerenes and fullerene derivatives, because of their interesting physical and chemical properties such as metallofullerenes<sup>5-10)</sup>, fullerene molecules<sup>11,12)</sup> superconductivity<sup>13)</sup>, medicine<sup>14)</sup>. Recently, it has become noteworthy and important to study the properties or the behavior of fullerenes by applying radiochemical techniques<sup>15-21)</sup>, since radioactive labeling of fullerenes and their derivatives is of considerable use in following the location and metabolism of these substances in living organisms. Previously radioactively labeled endohedral metallofullerenes were produced by neutron irradiation<sup>15-19)</sup>. However, a convenient means for labeling empty cage fullerenes is very desirable as they are much easier to synthesize and to handle. In our previous studies<sup>20-23)</sup>, Radioactive fullerenes such as <sup>11</sup>CC<sub>69</sub>, <sup>11</sup>CC<sub>69</sub> and dimers were produced by nuclear reactions because the initial recoil energy of the activated atoms was much

higher than the intramolecular bonding energy level in the fullerenes.

In this paper, we demonstrate the production of radioactive hetero-fullerenes labeled with  $^{13}\text{N}$  by the recoil process following nuclear reactions.

## § 2. Experimental Procedures and Data Analysis

Samples of 99.5% purified  $\text{C}_{60}$  or  $\text{C}_{70}$  fullerenes were wrapped in thin aluminum foil and irradiated with 8 or 10 MeV deuterons at the Cyclotron Radio Isotope Center (CYRIC), Tohoku University and the NTT Opto-electronics Laboratories. The beam current was typically  $3 \mu\text{A}$  and the irradiation time was set to 10 min. The samples were dissolved in carbon disulfide ( $\text{CS}_2$ ) and filtrated through a millipore filter (pore size= $0.45 \mu\text{m}$ ) to remove insoluble materials. After evaporating the  $\text{CS}_2$  solvent, the soluble fraction was dissolved again in solvent and injected into a HPLC (High Pressure Liquid Chromatography). A combination of equipped column and solvent was as follows, Buckyprep and toluene at a flow rate 1.5 ml/min, 5PBB and  $\text{CS}_2$  at a flow rate 0.75ml/min, Buckyclutcher<sup>20</sup> and toluene-hexane (7 : 3) with flow rate 3.0 ml/min, respectively. To detect fullerene derivatives, a UV detector was installed with the wave length of 285 nm for toluene and toluene-hexane (7 : 3) solution, and 380 nm for  $\text{CS}_2$  solution, respectively. Downstream of the UV detector, two  $\gamma$ -ray detectors consisting of a bismuth germanate photomultiplier (BGO PM) were also installed in order to count the 511 keV annihilation  $\gamma$ -rays in coincidence emanating from  $^{13}\text{N}$  with a half-life of 9.97 min<sup>26</sup>). The schematic view of the radiochromatography system is shown in Fig. 1 . Data about the radiochromatogram were accumulated by means of a multi-channel scaler system (MCS), using a personal computer. The eluent fraction was collected in 30 sec intervals, and the  $\gamma$ -ray activities of each fraction were measured with a Ge detector to confirm the 511 keV radioactive decay and the half-life of  $^{13}\text{N}$ .



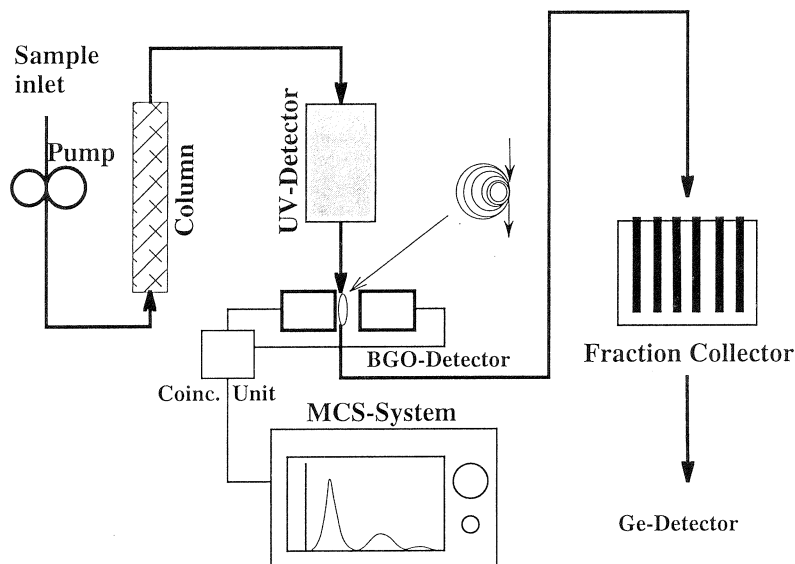


Fig. 1. Schematic view of the radiochromatograph system. To measure the 511 keV annihilation  $\gamma$ -rays from  $^{13}\text{N}$  with a high statistics, a capillary loop was set between the two BGO-detectors. A geometrical efficiency for counting the  $\gamma$ -rays in coincidence was estimated to be about 30%.

### § 3. Results and Discussions

Panels (a), (b) and (c) of Fig. 2 show the radiochromatogram obtained by means of the Buckyprep column and toluene solvent, (a) for the irradiated  $\text{C}_{60}$  sample, (b) for the  $\text{C}_{70}$ , (c) for the mixed sample of  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$  (1 : 1), respectively. The horizontal axis indicates the retention time after injection into the HPLC and the vertical one the counting rate of the  $^{13}\text{N}$  radioactivity corrected for the decay of  $^{13}\text{N}$ . The first peak (A) of (a) and the peak (C) of (b) in Figs. 2 can be assigned to  $^{13}\text{NC}_{69}$  and  $^{13}\text{NC}_{69}$  since the each peak corresponds to the  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$  absorption peak of the UV chromatogram, respectively. The peak (C) was also observed at retention time of 10-11 min in Fig. 2 (a), though no peak appeared after peak (C) in Fig. 2 (b). Five peaks appeared in the chromatogram in Fig. 2 (c). The peaks (A, B) are also attributed to  $^{13}\text{NC}_{69}$  and  $^{13}\text{NC}_{69}$ , respectively. Furthermore, the peaks (D, E) were observed at 14-18 min.

In order to confirm the peaks, an irradiation with bremsstrahlung of  $E_{max}=30$  MeV was applied to produce the radioactive fullerenes labeled with  $^{14}\text{C}$ , which is produced by the  $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{14}\text{C}$  reaction. Here, the Buckyprep column with a flow rate of 1.5 ml/min was used.

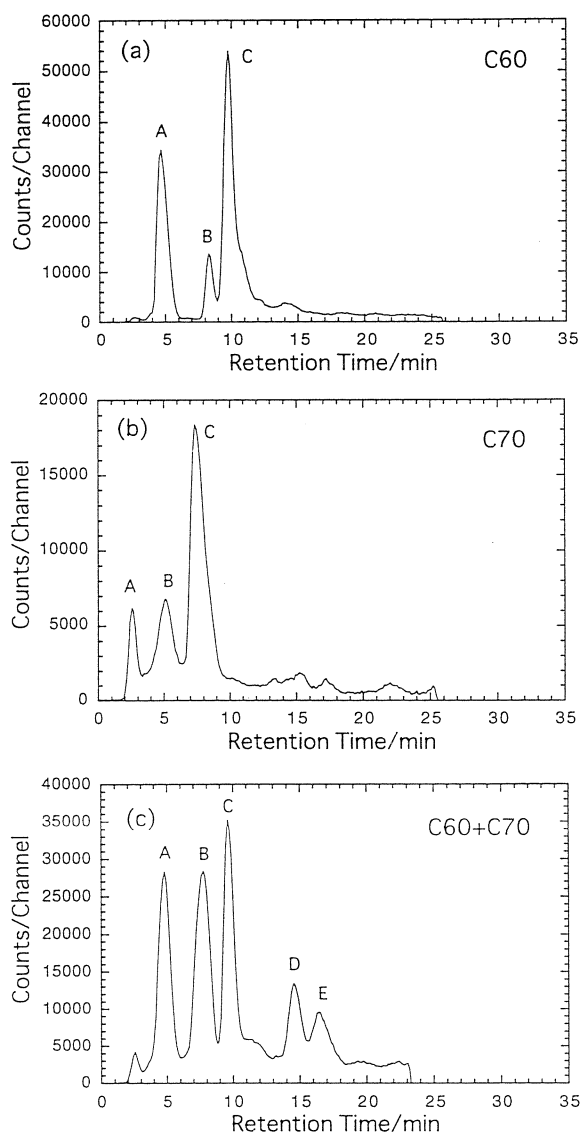


Fig. 2. HPLC elution curves of the soluble portion of the crude extracted with Buckyprep and toluene from the deuteron-irradiated fullerenes. Horizontal axis indicates retention time and the vertical axis is the counting rate of the 511 keV annihilation radiation measured with two BGO detectors in coincidence. (a) ; Radiochromatogram of the irradiated  $C_{60}$  sample. Peaks (A, C) indicate  $^{13}NC_{59}$  and its dimer, respectively. Peak (B) represents unknown by-products. (b); Same as (a) but for the irradiated  $C_{70}$  sample. Peak (C) indicates  $^{13}NC_{69}$ . Peaks (A, B) shows unknown byproducts. (c); Same as (a) but for the mixed sample of  $C_{60}$  and  $C_{70}$  (1 : 1). Peaks (A, B) indicate  $^{13}NC_{59}$  and  $^{13}NC_{69}$ , respectively. Peaks (C, D, E) seem to be dimers coalesced with  $^{13}NC_{59}$ ,  $C_{60}$  or  $^{13}NC_{59}$  or  $C_{70}$ ,  $C_{60}$   $^{13}NC_{69}$ , respectively.

The detailed procedure is described in previous papers<sup>20-23</sup> here, only the result is shown in Fig. 3. Only one strong absorption peak was observed in the elution curve which was measured by the UV detector, but two peaks appeared in the curve measured by the BGO detector (dashed line). According to the figure, the first peak corresponds to the  $C_{60}$  absorption peak of UV. This peak can be assigned to  $^{11}CC_{59}$ , which is produced in the irradiation of  $C_{60}$  fullerene by a  $^{12}C(\gamma, n)^{11}C$  reaction. The giant second peak was observed at a retention time at 9-11 min. This peak can be attributed to a larger radioactive molecule than  $C_{60}$ . As shown by a dotted line in the same figure, two peaks around 7 and 25 min were also observed in the elution curve when  $C_{70}$  sample was irradiated. The elution curve of the irradiated mixture ( $C_{60} : C_{70} = 3 : 7$ ) is also shown in the same figure by a solid line. Five peaks appeared in the chromatogram, the first and second one can be assigned to  $^{11}CC_{59}$  and  $^{11}CC_{69}$ , respectively, as confirmed by the UV detector. The peaks at the retention time of around 10 and 25 min correspond to the elution peaks of the irradiated  $C_{60}$  (dashed curve) and  $C_{70}$  (dotted curve), respectively, though the new peak at 14-17 min appeared only in the curve of the irradiated sample of the fullerene mixture (solid curve). Therefore, this peak is considered to be due to the product of the coalescence reaction between the  $C_{60}$  and  $C_{70}$  cages. These results indicate that the last three peaks on the solid line are due to dimerized fullerenes; namely  $^{11}CC_{59}-C_{60}$ ,  $^{11}CC_{59}-C_{70}$  or  $^{11}CC_{69}-C_{60}$ ,  $^{11}CC_{69}-C_{70}$ , respectively<sup>20-23</sup>

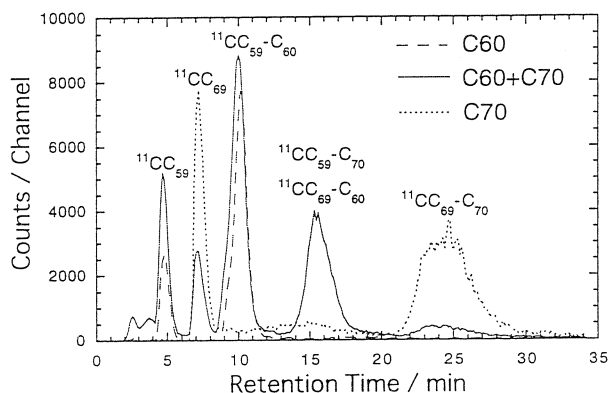


Fig. 3. HPLC elution curves of the soluble portion of the crude extracted with Buckyprep and toluene from the  $\gamma$ -ray irradiated fullerenes. Dashed line for the irradiated  $C_{60}$ , dotted line for the  $C_{70}$ , and solid line for the mixed of  $C_{60}$  and  $C_{70}$  (the weight ratio of  $C_{60}$  and  $C_{70}$  is 3/7) monitored with two BGO detectors in coincidence, respectively.

On the basis of these conjectures, each peak (C) in Figs. 2 (a) and 2 (c) can be assigned to a radioactive fullerene dimer of hetero-fullerene,  $^{13}\text{NC}_{59}\text{-C}_{60}$ , with the  $^{13}\text{N}$  on the cage, since the retention time was almost coincided with the first and second peak in Fig. 3 . It also seems that the two peaks at around 14-18 min also due to  $^{13}\text{NC}_{59}\text{-C}_{70}$  or  $^{13}\text{NC}_{69}\text{-C}_{60}$ , since the retention time of the peaks almost correspond to  $^{11}\text{CC}_{59}\text{-C}_{70}$  or  $^{11}\text{CC}_{69}\text{-C}_{60}$ . Two peaks of Fig. 2 (c) may indicate that the products generated from two molecules of  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$  by irradiation have several geometric isomers. The produced amount of dimers labeled with  $^{13}\text{N}$  was much lower than that labeled with  $^{11}\text{C}$ , probably due to the solubility of the irradiation products. This fact suggests that the dimer was not observed in Fig. 2 (b) when  $^{70}\text{C}$  was irradiated.

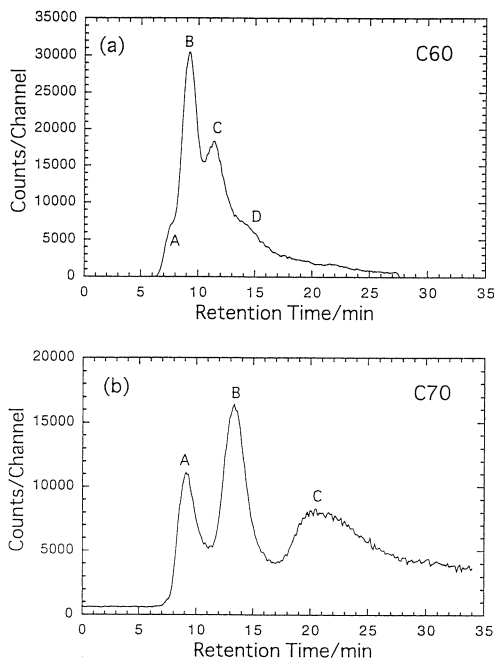


Fig. 4. HPLC elution curves of the soluble portion of the crude extracted with 5PBB and  $\text{CS}_2$  solvent in the deuteron irradiated fullerenes. Horizontal and vertical axes are same as Figs. 2. (a); Radiochromatogram of the irradiated  $\text{C}_{60}$  sample. The components (A,B,C,D) indicate the radioactive monomer, dimer, trimer, tetramer, respectively. (b) Same as (a) but for the irradiated  $\text{C}_{70}$  sample. The peaks (A,B,C) indicate the radioactive monomer, dimer, trimer, respectively.

Figs. 4 (a) and 4 (b) show the radiochromatogram of the irradiated  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$  obtained by

means of a 5PB column and CS<sub>2</sub> as solvent. In Fig. 4 (a), mainly four components appear in the chromatogram. The first component (A) coincides with the UV peak, so that this component suggests the existence of <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>. The following components (B, C, D) are regarded as the dimer, trimer and tetramer including <sup>13</sup>N on their cages. Three peaks in Fig. 4 (b) are also attributed to polymers such as <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>, <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>-C<sub>70</sub>, <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>-C<sub>70</sub>-C<sub>70</sub>, respectively. In this case, it is found that the solubility of these materials in CS<sub>2</sub> is much higher than that in toluene.

Two chromatograms with the Buckyclutcher column and toluene-hexane (7 : 3) solution are also shown in Figs. 5 (a) and 5 (b) for the irradiated C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> samples. Two peaks (A and B) in Fig. 5 (a) also indicate the <sup>13</sup>NC<sub>69</sub> and <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>-C<sub>60</sub> molecules. In Fig. 5 (b), no apparent compounds were identified except the peak (B), for <sup>13</sup>NC<sub>69</sub>, since the solubility of the dimers in the toluene-hexane (7 : 3) solvent might be extremely low.

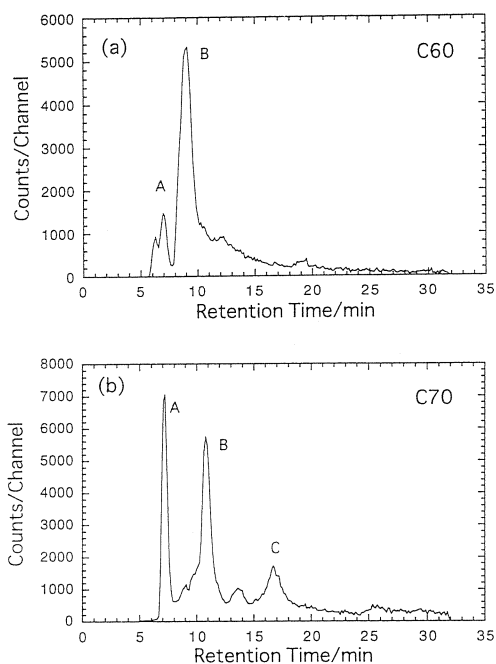


Fig. 5. HPLC elution curves of the soluble portion of the crude extracted with Buckyclutcher and toluene-hexane(7 : 3) in the deuteron irradiated fullerenes. Horizontal and vertical axes are same as Figs. 2. (a) ; Radiochromatogram of the irradiated C<sub>60</sub> sample. The peaks (A,B) indicate the radioactive monomer, dimer, respectively. (b) Same as (a) but for the irradiated C<sub>70</sub> sample. The peak (B) indicates the radioactive monomer. The peaks (A, C) are unknown byproducts.

For the labeling process, the following scenarios can be taken in account. The  $^{13}\text{N}$  atoms are produced by a  $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})^{13}\text{N}$  reaction and remove from their own place on the cage. The energy rich  $^{13}\text{N}$  nuclides destroy or ionize the non-affected fullerene cages, because their kinetic energies are estimated to be of a quite different order of magnitude, reaching a few hundred keV, as compared to the energy of molecular bonding. Therefore, this kinetic energy is released to the sample at a magnitude of the appropriate energy level. Finally an implantation process occurs ; the attack by  $^{13}\text{N}$  induces the fullerene network to open up, and the open end of the carbon cage recombines by taking in  $^{13}\text{N}$  and/or by getting bonded with the neighboring fullerene cage. The produced materials; monomers, dimers, etc., contain the  $^{13}\text{N}$  radio nuclide.

The solvent dissolved final fraction consists of unreacted fullerene and of its derivative products which originated from the coalesced fullerene molecules. The derivatives seem to be in a chemically stable state in comparison with the fullerene dimers and trimers which were detected by mass-spectrometry<sup>11,12</sup>, since unstable molecules, such as the incompletely networked or coalesced material, can be easily broken up by an interaction between the solvent and the fullerene cage. Currently, we are trying to analyze the coalesced products by mass spectrometry.

#### § 4. Conclusion

Fullerenes,  $\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$ , were irradiated by 8 and 10 MeV deuterons. The irradiated samples were first dissolved in  $\text{CS}_2$  and filtrated to remove insoluble products. From the separation process with a HPLC in a combination with columns and solvents, Buckyprep and toluene, 5 PBB and  $\text{CS}_2$ , Buckyclutcher and toluene-hexane (7 : 3), it was found that the solubility of the polymers formed were quite different in each solvent, and that 5 PBB and  $\text{CS}_2$  were rather useful as a tool to distinguish the several polymers of  $^{13}\text{N}$  hetero-fullerenes. Using a 5 PBB column, radioactive fullerenes fullerene dimers, trimers labeled with  $^{13}\text{N}$ , were isolated and detected in the liquid phase. It was also found that the energy rich  $^{13}\text{N}$  nuclide was successfully recombined with the fullerene cages to include the  $^{13}\text{N}$ . Further, there is a high probability for the disrupted cages react with neighboring cages.

### Acknowledgments

Authors are grateful to the technical staff of Laboratory of Nuclear Science (LNS) and Cyclotron Radio-Isotope Center (CYRIC) for the beam handling. Authors are also grateful to Prof. Wudl, Department of Chemistry and Materials, University of California, Santa Barbara, for providing us the hydroheterofullerene ( $C_{99}H_N$ ) and its dimer sample.

### References

- 1) H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl and R. E. Smalley : Nature **318** (1985) 162 .
- 2) W. Krätschmer, L.D. Lamb, K. Fostiropoulos and D. R. Huffman : Nature **347**, (1990) 354.
- 3) G. Peter and M. Jansen : Angew. Chem., Int. Ed. Engl. **31** (1992) 223.
- 4) J.B. Howard, J.T. Mckinnon, Y. Makarovsky, A. Lafleur, M.E. Johnson : Nature **352** (1991) 139.
- 5) Y. Chai, T. Guo, C. Jin, R.E. Haufler, L.P.F. Chibante, J. Fune, L. Wang, J.M. Alford and R.E. Smalley : **95** (1991) 7564.
- 6) R. D. Johnson, M.S. de Vries, J. Salem, D.S. Bethune and C. Yannoni : Nature **355** (1992) 239.
- 7) J. H. Weaver, Y. Chai, G.H. Kroll, C. Jin, T.R. Ohno, R.E. Haufler, T. Guo, J.M. Alford, J. Conceicao, L.P.F. Chibante, A. Jain, G. Palmer and R.E. Smalley : Chem. Phys. Lett. **190** (1992) 460.
- 8) H. Shinohara, H. Sato, Y. Saito, M. Ohkohchi and Y. Ando : J. Phys. Chem. **96** (1992) 3571 .
- 9) H. Shinohara, H. Sato, M. Ohkohchi, Y. Ando, T. Kodama, T. Shida T. Kato and Y. Saito : Nature **357** (1992) 52.
- 10) M. Takata, B. Umeda, E. Nishibori, M. Sakata, Y. Saito, M. Ohno and H. Shinohara : Nature **377** (1995) 46.
- 11) C. Yerezian, K. Hansen, F. Diederich and R. Whetten : Nature **359** (1992) 44.
- 12) S.W. McElvany, J.H. Callahan, M.M. Ross, L.D. Lamb and D.R. Huffman : Science **260** (1993) 1632.



- 13) A.F. Hebard, M.J. Rosseinsky, R.C. Haddon, D.W. Murphy, S.H. Glarum, T.T.M. Palstra, A.P. Ramirez and A.R. Kortan : *Nature* **350** (1991) 600.
- 14) S.H. Fridman, D.L. Sijbesma, R.P. Srdanov, F. Wudl and G.L. Kenyon : *J. Am. Chem. Soc.* **115** (1993) 6506.
- 15) K. Kikuchi, K. Kobayashi, K. Sueki, S. Suzuki, H. Nakahara, Y. Achiba, K. Tomura and M. Katada : *J. Am. Chem. Soc.* **116** (1994) 9775.
- 16) K. Sueki, K. Kobayashi, K. Kikuchi, K. Tomura, Y. Achiba and H. Nakahara : *Fullerene Sci. Techno.* **2** (1994) 213.
- 17) K. Kobayashi, M. Kuwano, K. Sueki, K. Kikuchi, Y. Achiba, H. Nakahara, N. Kananishi, M. Watanabe and K. Tomura : *J. Radioanal., Nucl., Chem.* **192** (1995) 81.
- 18) S. Yamago, H. Tokuyama, E. Nakamura, K. Kikuchi, S. Kananishi, K. Sueki, H. Nakahara, S. Enomoto and F. Ambe : *Chem. Biol.* **2** (1995) 385.
- 19) T. Braun : *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **203** (1996) 377.
- 20) T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki, K. Kobayashi and K. Kikuchi : *J. Am. Chem. Soc.* **117** (1995) 12869.
- 21) T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Kikuchi and K. Sueki : *Material Sci. Eng.* **217/218**, (1996) 38.
- 22) K. Masumoto, T. Ohtsuki, K. Sueki, K. Kikuchi and S. Mitsugashira, presented in the Int. Con. APSORC'97, and will appear in *J. Radioanal. Nucl. Chem.*
- 23) T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki, K. Kikuchi, K. Ohno, Y. Maruyama and Y. Kawazoe : AIP press, **CP416** (1998) 261.
- 24) C. J. Welch and W. H. Pirkle : *J. Chromatogr.* **609** (1992) 89.
- 25) C. M. Lederer and V. S. Shirley : eds. *Table of Isotopes*, 7 th ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1978).

### Ⅲ. 加 速 器 ・ 測 定 装 置

# ストレッチャー・ブースタリングの高周波加速系

核理研

内田智久・小山田正幸・日出富士雄  
浦澤茂一・封 碧波・渡辺勝美

ストレッチャー・ブースタリング（以下 STB リング）の高周波加速系について述べる。STB リングは現在、東北大学理学部原子核理学研究施設第二実験室に建設中の多機能な電子円形加速器である。STB リングの有する 3 種類の機能の内、蓄積リング機能とブースタリング機能において高周波加速を行なう必要がある。

高周波加速を行なうための各パラメータを決定し、高周波加速装置を構築した。その結果、安定した高周波加速系を構築する事ができた<sup>1)</sup>。

## § 1. 序

STB リング<sup>2)</sup> は原子核実験に用いられるとともに、将来建設が予定されている放射光リングの入射器として建設されている。概略図を第 1 図に、リング・パラメータを第 1 表に示す。

STB リングは以下の 3 種類の機能を持つ。

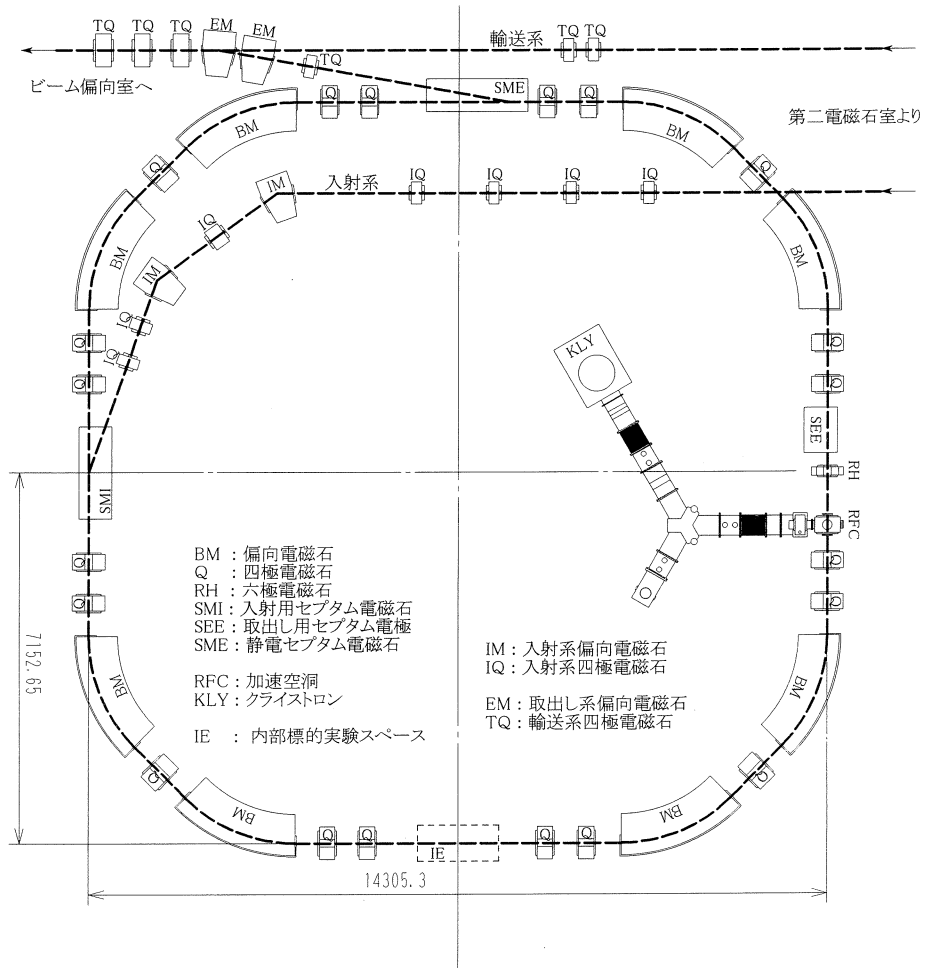
1. ストレッチャー・リング機能  
線型加速器から入射されたパルス・ビームを連続ビームにする機能。
2. 蓄積リング機能  
電子を蓄積する機能。
3. ブースタ・リング機能  
電子のエネルギーを上昇させる機能（最大エネルギー 1.2 GeV）。

高周波加速は第 2、第 3 の機能に対して必要とされる。

第 1 表 STB リング・パラメータ。

Parameter	Value
Maximum electron energy	1.2 GeV
Storage mode	0.3 GeV
Stretcher mode	0.3 GeV
Circumference of ring	49.7512 m
Mean radius	7.9182 m
bending magnet radius	3.0 m
Momentum compaction factor	0.037767
Revolution frequency	6.02583 MHz
Revolution time	165.95 ns
Horizontal Betatron Frequency	3.30
Vertical Betatron Frequency	1.20
Horizontal Chromaticity	-5.7861
Vertical Chromaticity	-4.9791
Synchrotron radiation loss per turn	
Storage mode	
(Electron energy 1.2 GeV)	61.2 keV
Stretcher mode	
(Electron energy 0.3 GeV)	239 eV
Maximum beam current	300 mA





第1図 STBリング全体概略図。

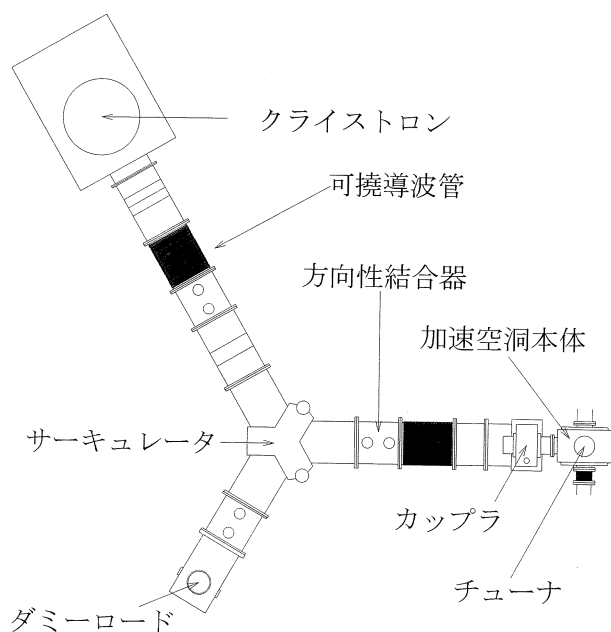
高周波加速では、高周波増幅器（クライストロン）から高周波電力を加速空洞に供給し加速電場を発生させて粒子を加速するが、この際に電磁場を通過する粒子が加速電磁場を乱してしまう事による影響や装置の周囲温度変化による特性変化など様々な変化に影響されないように装置を制御しなくてはならない。この制御装置を設計製作し高周波加速系として完成させる事が今回の目的である。

ここでは高周波加速を行なう為の装置系をRF系と呼ぶ事にし、機能的な面からこの系を大きく2つに分ける事にする。1つは実際に加速空洞に高周波電力を供給する高電力RF系であり、もう1つは高電力RF系の制御を行なう低電力RF系である。

高電力RF系は立体回路のことであり、クライストロンや加速空洞などが構成部品である。

クライストロンは東芝製 E3774 であり最大出力電力 180kW (CW) である。加速空洞は高エネルギー加速器研究機構から移管されたものであり、定在波型加速空洞で加速電界を上げるためにノーズコーン型を採用している<sup>3)</sup>。STB リング高電力 RF 系ではクライストロン 1 台を加速空洞 1 台に導波管で接続している。クライストロンと加速空洞の間には、クライストロンを加速空洞からの反射波より守るためにサーキュレータを接続している。このサーキュレータにダミーロードを接続し反射波を熱に変換している。

高電力 RF 系の設置図を第 2 図に示す。



第 2 図 高電力 RF 系第二実験室内配置図。

## § 2. リング機能別高周波加速パラメータの考察

リング機能別に高周波加速に関するパラメータ（以下 RF パラメータ）を決定した。

### 2.1 蓄積リング機能

蓄積リングへの重要な要求は粒子寿命と最大蓄積ビーム電流である。したがって、この 2 つの条件を課す事により RF パラメータを決定した。

STB リングの粒子寿命は数十分あれば十分であるが、RF パラメータにより粒子寿命が制限されないように、量子寿命と呼ばれるパラメータに 1 日という条件を課した。また、最大蓄積

ビーム電流は300mA を目標にしているために、この条件をスタティック・ロビンソン安定条件に適用しRFパラメータを求めた。

求めたRFパラメータを第2表に示す。

## 2.2 ブースタ・リング機能

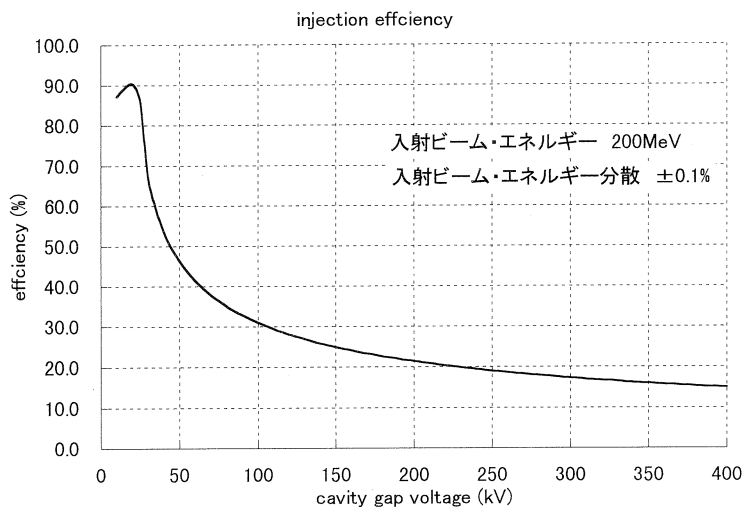
ブースタ・リングは入射された粒子をできるだけ多く、目的のエネルギーに上昇させなければならない。したがって、入射時にできるだけ多くの粒子を受け取り、その受け取った粒子を数多く目的のエネルギーに上昇させる必要がある。前者は入射効率の問題であり、後者は加速方法の問題である。

STB リングにおける入射効率を数値計算した結果を第3図に示す。空洞電圧24.694kV で最大になっている。

第2表 STB リングRF関係パラメータ(ストレージ・モード)。

Parameter	Value
Beam energy	1.2GeV
Accelerating frequency	500.143MHz
Synchrotron oscillation frequency	55.5kHz
Synchrotron oscillation period	18.0 $\mu$ s
Harmonic number	83
Momentum compaction factor	0.037767
Synchrotron radiation loss per turn	61.2keV
Cavity gap voltage	211kV
Synchronous phase angle	73deg
Cavity tuning angle*	-73deg
Cavity shunt impedance	8M $\Omega$
Power dissipated in cavity wall	5.57kW
Beam power*	18.4kW
Reflected Power*	2.41kW
Generator Power*	26.3kW
Cavity unloaded Q-value	39000
Cavity loaded Q-value	12000
Cavity coupling coefficient	2.3
Cavity filling time	7.5 $\mu$ s
RF Bucket height	4.58 $\times 10^{-3}$
r. m. s. energy spread	5.94 $\times 10^{-4}$
r. m. s. bunch length	38.5mm
Radiation damping time of synchrotron oscillation	3.26ms

\* ビーム電流300mA 時の値



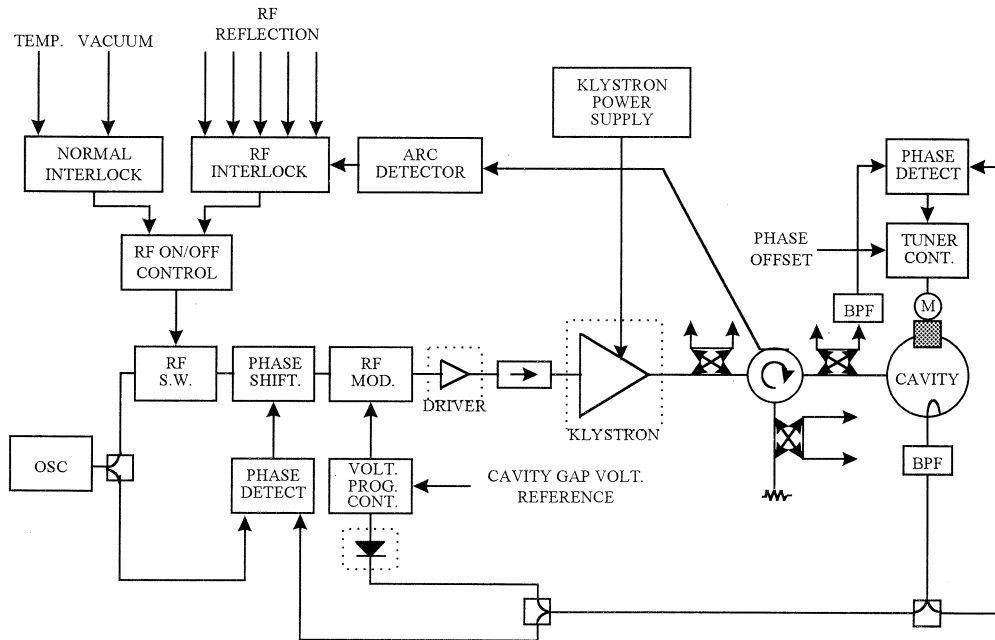
第3図 入射効率。

加速方法については、ビーム・エネルギーに対して空洞電圧一定のまま加速する方法と空洞電圧を変化させる方法を検討した。その結果、どちらの加速方法においても入射時に受け取った粒子を目的エネルギーまで上昇できる事が分かった。この事は、空洞電圧一定のまま加速する方法の場合、最終的に目的エネルギーまで上昇できる粒子が少ない事を示している（蓄積モードでの要求から、入射時の空洞電圧を高くしておく必要があるので入射効率が下がる為）。しかしながら、空洞電圧一定で加速する方法は制御方法が簡単になる長所がある。これに対し、空洞電圧を変化させる方法は、最終的に目的エネルギーまで上昇できる粒子が多い。しかしながら、制御方法が非常に複雑になる短所がある。

今回は空洞電圧を一定のまま加速する方法を採用しRF系を構築した。これは、STBリングにおいて初めての加速実験を行なう事を想定しRF系を構築したので制御系を簡単にしたかった為である。将来はSTBリングの性能を十分に活用する為に空洞電圧を変化させる方法で加速を行う必要がある。

### § 3. 低電力 RF 系

加速空洞内電磁場の制御系を設計するために本研究では自動制御論を用いた負フィードバック制御回路を3系統設計製作した。また、加速器で用いる高周波電力は非常に大きいので異常



第4図 RFブロックダイアグラム。



が発生すると事故につながる可能性がある。そこで、異常発生時に事故を防ぐインターロック回路を構築した。

高周波加速系のブロックダイアグラムを第4図に示す。

### 3.1 空洞内電磁場振幅の安定化

加速空洞内電磁場振幅を安定化する回路を、ここではAGC (Automatic Gain Control) 回路と言っている。AGC回路は負フィードバック制御により自動制御を行なっている。

加速空洞内電磁場振幅は空洞への供給電力変化で大きく変化する。特にクライストロン出力変化に大きく影響される。このクライストロン出力はクライストロン電源による影響が大きい。実際、AGC回路を停止させた場合にはクライストロン電源の影響と思われるスパイク状の波形が観測されている。AGC回路はこのような外乱を吸収し加速空洞内電磁場振幅を安定化する。

AGC回路の目標を空洞電圧変化率5%以下と設定した。これは、スタティック・ロビンソン安定条件とRFバケット・ハイトが0.5%になる空洞電圧の考察から決定した。

製作した回路を動作させ測定した結果、空洞電圧変化率を4.5% (AGC回路を停止させると空洞電圧変化率は9.5%以上) に抑える事が分かった。これは、目標値の5%以下を満たしており、十分な安定度である。

### 3.2 空洞内電磁場位相の安定化

加速空洞内電磁場位相を安定化する回路を、ここではPLL (Phase Lock Loop) 回路と言っている。PLL回路は負フィードバック制御により自動制御を行なっている。

PLL回路は外部基準信号との同期をとることが主目的であるが、外部基準信号が存在しないのでクライストロン出力高周波位相の安定化が主な動作目的となる。

将来、外部基準信号を使用する場合は本回路で対応する事ができる。外部基準信号を使用する時とは、例えば入射加速器や放射光リングと同期をとる場合である。

将来外部基準信号を用いて同期をとる事を考慮しPLL回路自身の安定度の目安を測定した。その目安とは、位相余裕、利得余裕、バンド幅である。これらの値は開ループ特性を測定する事により求める。

目標値をバンド幅5kHz、利得余裕10dB、位相余裕 $10^\circ$ とした。バンド幅はシンクロトロン振動数(55.5kHz)よりも十分低い周波数で、利得余裕、位相余裕に関しては十分余裕のある

値として設定した。

測定した結果、バンド幅：約 4 kHz、利得余裕約10dB、位相余裕：約25°となり、十分な安定性が得られた。

現在の外乱に対しては十分安定に動作している。また、将来外部基準信号を使用しても安定に動作すると考える。

### 3.3 加速空洞共鳴周波数の安定化

加速空洞の共鳴周波数を安定化する回路を、ここではチューナ PLL回路と言っている。チューナ PLL回路は負フィードバック制御により自動制御を行なっている。

STB リングではオプティマム・チューニング法を採用しているため、ローディング・アングルのゼロに制御する。これは、クライストロン電力を最小にする方法であり、加速空洞を共鳴状態にする事を意味する。

加速空洞共鳴周波数は冷却水温変化、加速空洞壁損失などにより変化する。また、ビーム負荷が存在した時にはチューニング・アングル変化を補償しなくてはならない。

以上の事から第一の目的は冷却水温の変化などビーム負荷に関係しない共鳴周波数変化を補償するためである。それらの変化の中で大きな影響を与えるものが冷却水温変化である。そこで、実際の冷却水温変化（1℃/min程度）に十分な余裕を考えて0.2℃/sec（12℃/min）の温度変化による共鳴周波数の変化を補償する値を目標値とした。この値は、位相補償量で表わすと5.5°/secである。

第二の目的であるチューニング・アングル変化に対する補償は、空洞電圧一定で加速する方法に対して、空洞電圧211kV、ビーム電流300mAの時、0.7°/secである。

従って、空洞電圧一定で加速する場合には、冷却水温変化に対する補償ができれば十分である事が分かる。

チューナによる位相補償速度を測定した結果22°（±2°）/secとなった。目標の5.5°/secに比べ非常に大きな値になった。測定結果から考えると冷却水温変化が0.8℃/secまで冷却水温変化に対する共鳴周波数の補償ができると言える。

### 3.4 異常発生時にRF供給を遮断

インターロック回路は異常発生時に高電力RF系へのRF供給を遮断する回路である。

ここでの異常とは、加速空洞の真空度の悪化や設計値からは考えられない高周波電力が出力

された時などである。

高電力RF系に関係するインターロック（異常）信号を処理するブロックをRFインターロックと呼んでいる。このような異常としてRF電力異常とアーク放電検出がある。

RF電力異常とは高電力RF系で設計値では考えられない大電力が観測される事を言い、低電力RF系のどこかで異常が発生し、その影響が高電力RF系に伝わった場合や、高電力RF系自身に何らかの異常が発生した場合に発生する。このような大電力が長時間続くと系の装置を破損する可能性がある。そこで高電力RF系の主要な部分においてRF電力を観測し、規定電力よりも大きな電力が観測された時にはRFの供給を断ち、RFによる事故を防ぐ事が必要になる。監視を行なうのは、クライストロン出力、カップラ入力およびダミーロード入力における3箇所である。クライストロン出力の監視では異常な反射波によりクライストロン本体の出力部が破損する事を防ぐ。カップラ入力では異常な入射波によりカップラが破損する事を防ぐ。ダミーロード入力では入射波が規定の電力を超えない事と、ダミーロードが何らかの理由により故障した時にダミーロードからの反射波が発生する事を監視しクライストロン本体が破損する事を防ぐ。

アーク放電検出はサーキュレータの接続導波管に取り付けられている検出器で行なっている。アーク放電が長時間続くとRF電力異常と同様に系の装置を破損する可能性がある。そのためRFの供給を断ちアーク放電による事故を防ぐ事が必要になる。

高周波関係以外のインターロック信号を処理するブロックをノーマル・インターロックと呼んでいる。したがって、加速空洞本体の真空度やダミーロードなどの温度異常など状態悪化した影響がすぐに現れにくい信号をノーマル・インターロックで監視する。

加速空洞本体中の真空度が悪化すると空洞内で放電などが発生する可能性がある。そこで、加速空洞本体と静電セパタム電極の間にイオンポンプが設置されている。このイオンポンプでの真空度を監視し放電を防ぐ事が必要である。また、ダミーロードの温度が異常に高い場合にはダミーロードが故障する可能性がある。そこで、ダミーロードの温度を監視する事によりダミーロードの故障を防ぐ必要がある。

#### § 4. 今後の課題

空洞電圧一定で加速する方法で加速する事を想定しRF系を構築した。その結果、非常に安定したRF系を構築する事ができた。

最後に、これからの課題を検討しておく。

第一に空洞電圧一定で加速を行い系が十分安定している事を確認する必要がある。

本研究では空洞電圧一定で加速する方法を想定してRF系の設計および調整を行った結果、安定したRF系を構築する事ができた。現在の外乱に対しては十分に安定動作している。しかしながら、ビーム運転下の外乱については実際にビーム運転を行なってみなければわからない要素がいくつか残っている。特に雑音による外乱は正確に予測する事が非常に困難である。今後、何らかの方法でビーム運転を行なっている状況下でのノイズなどの外乱を予想してバンド幅を変更するなど各回路の補償を行なう必要がある。

第二に空洞電圧を変化させて加速できるようにRF系を開発、改良する。

本研究では空洞電圧一定で加速する方法を想定してRF系の設計および調整を行なった。その理由は、初めての加速実験では先ず簡単な制御方式である空洞電圧一定で加速する方法により加速できる事を確認する必要がある為である。したがって、空洞電圧一定で安定に加速が行えるようになった後には入射効率の良い、空洞電圧を変化させる方法にする必要がある。しかしながら、空洞電圧を変化させる方法で加速を行なう為には種々解決しなければならない問題が残されている。以下、現時点で予測できる以下の2つの問題点について簡単に説明する。

#### 1. 電力制御に関する問題

この問題は空洞電圧を変化させるために生じる問題である。空洞電圧変化をクライストロン電力に換算すると約100Wから約30kW程度まで変化させなければならない。これはRF系が約25dBの変化に対応できるかという事であるが、現在の回路系では約25dBの変化に対応する事は難しいと考える。ここで、対応という意味は各回路が外乱に対して安定に動作する事を意味する。対応する事が難しい理由は各モジュールが約25dB程度の線形領域を持っていない為である。

#### 2. チューナの位相補償速度に関する問題

空洞電圧を変化させて加速する場合、チューニング・アングルが大きく変化する。この際に現在のチューナー移動速度では追従できない。そこで、チューナまたはカップラの開発を含めた検討が必要である。

第三に空洞電圧を変化させて加速を行い系が十分安定している事を確認する。

参 考 文 献

- 1) 内田智久：修士論文 東北大学 1998.
- 2) 玉江忠明, 小山田正幸, 加藤正博, 菅原真澄, 山川達也：核理研研究報告 **30** (1997) 81.
- 3) K. Batchelor and Y. Kamiyama : R. F. Cavity Design for the Photon Factory KEK 79-25 (1979).

# ストレッチャー・ブースタリングの真空系

核理研

今野 収

## § 1. 序

ストレッチャー・ブースタリング (STB) の真空系を設計する上で、検討した主な事項とその経緯及びこれまでの試験運転状況について述べる。なお、真空系は偏向電磁石の曲率  $\rho = 3$  m, エネルギー1.2GeV, 蓄積電流300mA (3ターン入射時) の放射光による発熱 (ガス放出量) を想定し設計した。

## § 2. 真空系の基本設計

### 2.1 STB リングの主な検討事項

- 1) ブースタ運転を行う場合、偏向電磁石の励磁電流は500A/0.4sec (0.3T → 1.35T, 電源容量: 1100V, 1170A, パルス運転時: 230A~1040A, 偏向電磁石 8 台の直流抵抗0.147 $\Omega$ , インダクタンス0.456H) で電流を上下させる必要があり、偏向ダクトの材質とその厚みによる渦電流の効果が問題となる。
- 2) 偏向ダクトの偏向角度は  $\rho = 3$  m, 長さ=約 3 mとなっている。このダクトに入射する放射光の入熱は1.2GeV, 300mA で計算した時, 約1.3kW/mとなる。この入熱に対するダクトの発熱対策。
- 3) 入射部ダクトの構造について。同ダクトは偏向電磁石 (BM7) の励磁コイル中を通る。このために入射ビームは漏れ磁場の影響を受ける。
- 4) 原子核実験用偏向ダクト (Tagging 実験用) に使用する Ti 膜窓の機械的強度について。
- 5) 真空仕様の電磁石及び電極用大型真空槽の構造及び真空シール材の検討。
- 6) セラミックダクトの内面コーティング膜厚さと組成について。
- 7) ビーム輸送系の真空圧力と実験装置間に約2桁の差圧が生じる。
- 8) 真空材料の誘導放射能強度。
- 9) 大気開放方式について。

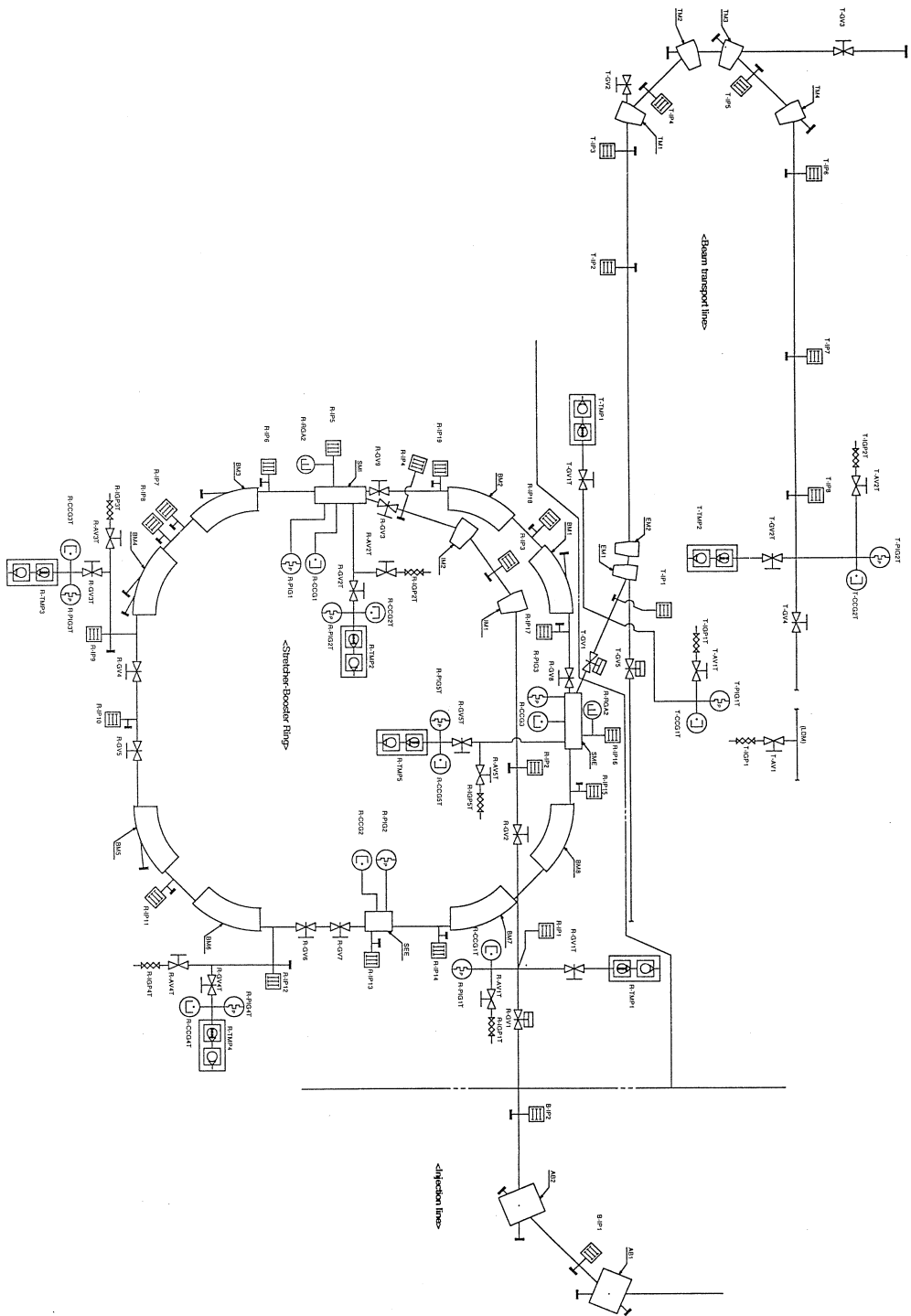
以上の諸問題点について検討を行った。

## 2.2 設計の基本方針

STB リングは蓄積リングと異なり、周回するビーム軌道が変わるためにダクトの内幅（120 mm 幅×40mm 高さ）が広がる。また、リングの直線部の3箇所にはビームの軌道を変える真空仕様の電磁石と電極を入れる大型真空槽を設置した。この大型真空槽からのガス放出量を軽減する事は難しく、局所的に圧力は高くなる。尚、放射光によるダクトの発熱を抑えるために、放射光が照射される部分に SUS と Cu の爆着クラッド板（クラッド板）を採用した。これらの点を考慮して、次の様な方針をたてた。

- 1) ダクトの形状変化対策はとらない。
- 2) STB 全体のベーキングは行わず、各部品毎に十分な化学洗浄処理を行ない、ベーキングをする。処理後のダクトは高純度乾燥窒素ガスを充填し、組み立て時の大気開放時間を極力短くする。
- 3) STB の組み立てが完了した箇所から部分的に真空排気する。
- 4) 真空仕様電磁石と電極を入れる大型真空槽の真空シール材はヘリコフレックスを採用する。しかし、運転調整段階では電磁石や電極の調整が必要となるので、当初はゴム O-ring を使用する。
- 5) 真空仕様電磁石（入出射用セプタム電磁石：SMI×2, SME）と電極（静電セプタム：SEE）は構造上、ベーキングができないので、組み立て時に十分な化学洗浄を行う。
- 6) 運転当初は大型真空槽及び電磁石、電極からのガス放出量は大きく、IP（150 l/s）×1 台による真空保持は困難である事から粗排気装置（TMP：300 l/s）を併用する。
- 7) STB リングの大気開放時は高純度乾燥窒素ガスをフィルター（油と水分の除去）を通して入れる。
- 8) STB リング本体の真空材料は渦電流等の関係から SUS316L とするが、リニアック輸送系と STB 入射部及びビーム輸送系は真空材料の放射化とガス放出量の軽減の為にアルミニウム合金製とする。ただし、費用の点からベローズは SUS316L とした。
- 9) 保持ポンプは STB 本体、入射部、ビーム輸送系共に 150 l/s を使用する。（入札の都合上）

以上の方針を基にリング全体の粗排気ポンプと保持ポンプの総排気容量を計算し管内の圧力がほぼ、一樣になるように設計した。STB リング系全体の排気系統図を第 1 図に示す。各系の総排気速度は STB 本体が 4.350 l/s（IP150 l/s × 19 台，粗排気系 TMP300 l/s × 2 台），STB 入射部は 750 l/s（IP150 l/s × 3 台，粗排気系 TMP300 l/s × 1 台），ビーム輸送系は 1,800



第1図 STBリングとビーム輸送系の真空排気系統図。



ℓ/s (IP150 ℓ/s × 8 台, 粗排気系 TMP300 ℓ/s × 2 台)とした。

### § 3. ストレッチャー・ブースタリングの排気系

#### 3.1 材料のガス放出量

偏向ダクトを含む各真空材料からのガス放出量及びガス分圧は電子線照射法<sup>1)</sup>で測定した測定値を用いた。この測定値は従来から用いられてきた昇温脱離法の測定値よりも約1桁以上も大きな値を示している。しかし、このガス放出量はリング運転時の初期値(ガス放出量)に最も近い値を示しており、ポンプの総排気量を設計する上で非常に重要である。また、同測定法は全圧と分圧を同時に計測する事ができるので材料の真空特性(真空の質)を評価する上で有効である。

##### 3.1.1 イオンポンプ(IP)の実行排気速度

IPの排気速度は100 ℓ/s(実際には150 ℓ/s)、排気口は約100φ(97.6φ)としてコンダクタンス C

$$C = 121 \times (D^3/L) \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (1)$$

から求め、ポンプの実行排気速度を求めた。この結果、配管の長さ  $L = 300$  の時の実行排気速度  $Se$  は約79 ℓ/s、 $L = 200$  の時の実行排気速度  $Se$  は約85 ℓ/s で排気速度に大差はない。この計算の結果からポンプ配管の長さは前後のダクトの組立易さを考慮して各箇所毎に長さを調整した。

##### 3.1.2 リング系内の圧力分布

各ダクト毎にコンダクタンスを計算し、その実行排気速度からリング系内の圧力分布を求めた。本計算はダクトからのガス放出量を電子線照射法で測定した各材料(SUS316L, OFHC, Cu, Al)の結果を基にした。STB 本体はSUS316LとOFHCのガス放出量を加味してその平均値  $Q = 6.0 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \ell/\text{s} \cdot \text{m}^2$  から求めた。各部の圧力は

- 1) ポンプの実行排気速度。
- 2) 各ダクトのコンダクタンスの計算。
- 3) 各ダクトの表面積からガス放出量を計算。

に別けて計算し求めた。この計算結果から各ダクトの両側にポンプを配置した時、ダクト中心部の圧力を求めSTB全体の圧力分布が一様になるようにポンプを配置した。STBのダクトの断面形状は偏向電磁石用ダクトと四極電磁石及び直線ダクト共に内幅=120mm、高さ=40mmのレーストラック状を採用した。各ダクト毎の断面形状からコンダクタンスを計算し

$$Vdp/dt = PS - Q \quad (2)$$

から  $P = Q/S \quad (3)$

によって各部の圧力を求めた。TMP の実行排気速度  $Se$  は約140  $\ell/s$ , IP 部の実行排気速度  $Se$  は約53.16  $\ell/s$  が得られる。ガス放出量は放射光による影響が最も大きくその値をエネルギー  $E$  が1.2GeV, 蓄積電流300mA, リング周長  $L$  を50m として, ビームを蓄積した場合の脱ガス分子数  $N_q$  (sec) を計算すると

$$N_q = 4.84 \times 10^7 (E/L) N \cdot D_\eta \{1 - (\lambda_c / \lambda_a)^{1/2}\} \quad (4)$$

ここで

$\eta$  : 1 個の光子で放出される光電子数

$D$  : 1 個の電子で放出される分子数

$D_\eta$  :  $2.5 \times 10^{-6}$

$\lambda_c$  : 臨海波長

$\lambda_a$  : 光電子放出のしきい値の波長 1200 Å

である。この式からリングの脱ガス量  $Q_{sor}$  は

$$Q_{sor} = 2.66 \times 10^{-5} \text{Torr} \cdot \ell/\text{sec}$$

全体として  $Q = 2.82 \times 10^{-5} \text{Torr} \cdot \ell/\text{sec}$

が見込まれる。各ダクトの断面形状と長さから求めたコンダクタンスと実行排気速度及び表面積から STB 全体の平均圧力を求めるとその平均圧力  $P$  は

$$P = 2 \times 10^{-7} \text{Torr}$$

となる。

### 3.1.3 放射光によるダクトの発熱について

ダクトに入射する放射光の入熱は1.2GeV, 300mA で計算した時, 約1.3kW/m となる。クラッド板の厚さを5mm (SUS3mm + Cu2mm)とし, その外側を冷却水 (20, 30, 40°C) が流れている時に, ダクトの温度が熱平行に達した時の温度を熱伝導方程式で解析した。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad (5)$$

ここで

$\rho$  : density

$C$  : 比熱

$k$  : 比熱伝導率

である。ここで、ダクトを mesh に切って求める。

但し、 $Q$ は

$$Q = \begin{cases} Q_{in} : \text{入熱} \\ \bar{k} : \text{水温} & \bar{k} (T-T_{\text{water}}) : \text{熱伝達係数} \\ \varepsilon \alpha T^4 : \text{空冷} & T^4 = (273 + T)^4 \end{cases}$$

として、mesh の各点に必要な  $Q$  を課して求める。ダクトの温度が平行になるまで繰り返し計算する。

計算条件を

冷却水温度	20, 30, 40 °C
熱伝達係数	$h = 1.0, 0.7 (0.855 \times 10^4 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C})$
SUS 熱伝導率	$0.164 \text{ J/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{°C}$
Cu 熱伝導率	$3.95 \text{ J/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{°C}$
$\varepsilon$ : 輻射率	0.3

のように取った。

計算の結果、ダクト壁面の温度は冷却水温と流量に大きく依存し、SUS 板単体（水温30°C、最高温度約262°C）よりもクラッド板（SUS 3 mm + Cu 2 mm）の温度勾配は緩やかとなり有効である。

上の条件は冷却水が乱流状態として求めた。尚、ビームサイズは1 mm  $\phi$  とした。

ダクトの発熱はガス放出量を最小限に抑える為に100°C以下となるように、冷却水温、流量（60.5  $\ell$ /s）、流速（1 m/s）を仮定した。しかし、計算の結果同上の条件で水温30°Cの時、最高温度は約127°Cが見込まれ、Cu 板の厚さを1 mm、幅を10mm としても熱拡散は十分である事が解った。

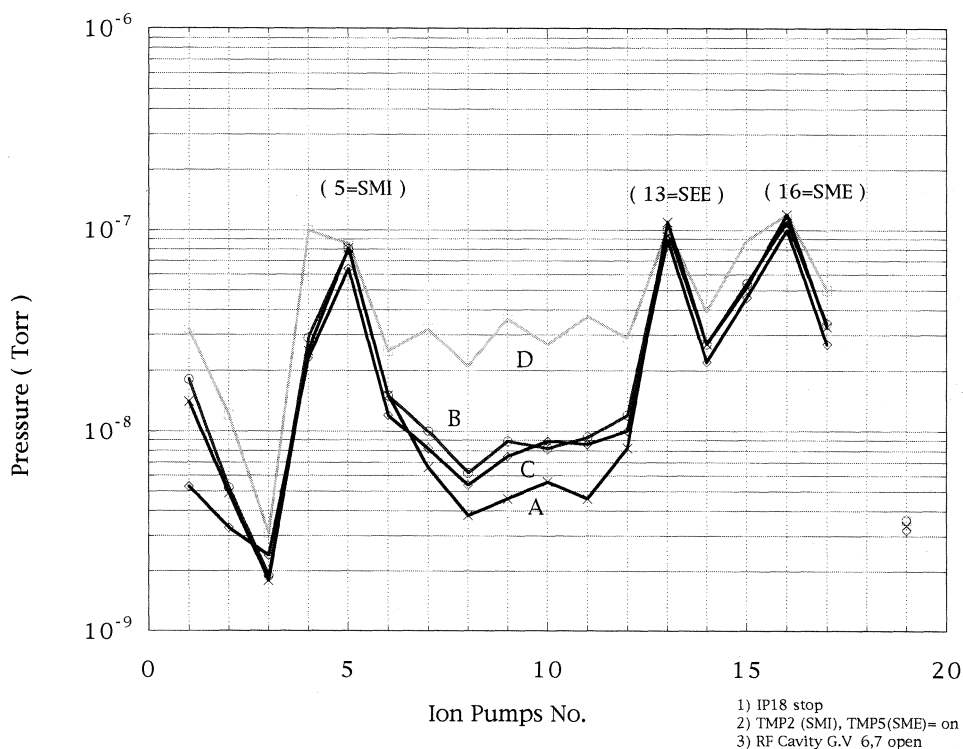
### 3.1.4 リング系内の圧力とビーム寿命

実験上の要請は1.2GeV、300mA でのビーム寿命を1 hr としており、リング系内の圧力（on beam 時）を  $P = 4.9 \times 10^{-8}$  Torr 以下にする必要がある。しかし、本計算での平均圧力は  $P = 2 \times 10^{-7}$  Torr が見込まれる。現時点ではキッカーマグネット（KM）の立ち下り時間が設計値よりも長く、蓄積電流は設計値の1/100程度と低くい為に圧力は低い状態にある。今後、蓄積電流の強度が大きくなった時には系内の圧力上昇が想定される。しかし、運転時間が長くなると共に周回するビーム電流によるセルフクリーニング作用によってダクトからのガス放出量は減少する。この結果、ビーム寿命を1 hr に延ばす事は可能であろう。また、インターナ

ルターゲット実験はビーム寿命が10min程度を必要とするが（電流が大きくなっても）問題はない。

### 3.1.5 試験運転時の圧力分布

98年9月29日現在，ストレッチャーモードは入射エネルギーが198MeV，平均入射ビーム電流は約8 mAとなっている。又，ブースタモードは最高加速エネルギーは1.2 GeV，蓄積電流は直流変流器 DCCT で測定できる最高限界電流約30mA を記録している。これら運転時の IP の圧力変化を第2図に示す。第2図はストレッチャー運転（図中 B，入射エネルギー198MeV，入射電流約4 mA），ブースタ運転時の加速エネルギー903MeV に於いて平均蓄積電流約600  $\mu$ A（図中 C）と平均蓄積電流400  $\mu$ A（図中 D），STB 運転停止中（図中 A）の4点について示した。なお，ブースタ運転時の図中 D は STB の  $Q_{focus}$ ， $Q_{de-focus}$  電磁石の電流をチューン測定のために変えており，周回ビームの軌道が「ズレ」て，蓄積電流の損失が増大した時のデータ



第2図 試験運転中のSTBリング系内の圧力分布。

図中 A は運転停止中の圧力，同 B はストレッチャーモード運転，同 C はブースタモードでの運転時の圧力，同 D はブースタモードで STB リングのチューン測定中を測定している為にビームロスが大きく圧力が高い。

で、リング内の真空圧力が最も悪化した例を示した。尚、3ヶ所の大型真空槽の真空シール材はゴム O-ring を使用している。

#### § 4. 偏向ダクトの材質と偏向電磁石磁場への影響

ストレッチャー・ブースタリングは2.1の1)に基づいて SUS316L を選定した。また、2.1の3)の入熱を考慮して偏向ダクトは SUS + Cu のクラッド板を放射光が当たる箇所(外側を水冷却)に採用した。しかし、放射光対策としてクラッド板を使用した事により、Cu 板の影響で偏向電磁石の磁場に乱れが起こる。

##### 4.1 爆着クラッド板の真空特性

爆着板 (Cu + SUS) を放射光入熱対策として使用した場合、Cu 部分の厚さをどの程度にすべきかを検討し、その加工法(精度)と洗浄方法及び真空特性について十分検討した。使用する爆着クラッド板は SUS と Cu の板厚を10mm 以上にして爆着し、目的の厚さに機械加工した。さらに、水冷却部の板厚は溶接時の熱歪みを考慮して SUS は厚さ 3 mm, Cu 板は上下巾を10 mm, 厚さ 1 mm に機械加工した。材料の板取り加工方法は薄板をレーザー加工で切断し NC フライスにより製作した物を TIG 溶接又は電子ビーム溶接した。クラッド板境界面での気密は $-196^{\circ}\text{C}$ から $+80^{\circ}\text{C}$ を100回、 $350^{\circ}\text{C}$ で1 hr を先の温度サイクル後にヘリウムガスリーク試験を行った。この結果、 $1 \times 10^{-11} \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec}$ 以下のリーク量であることを確認した物を採用した。

##### 4.2 磁場への影響

偏向電磁石の磁場(設計値)は0.3T から1.35T まで0.4sec で立ち上げ数秒間の平坦部、その後、また0.4sec で0.3T まで磁場が下がる。この条件下での渦電流による発熱と平行磁場への影響について検討した。

##### 4.2.1 渦電流による発熱

SUS の厚さを計算コードの関係から、ダクトの寸法は $100 \times 40$ 、板の厚さ 2 mm, 比透磁率  $\mu = 4000$ , 電気伝導率  $1.39 \times 10^6 (\Omega \text{ m})^{-1}$  として計算した。但し、諸特性は材質 SUS304 を用いた。

$$\text{発熱量は} \quad dP = (1/\sigma) \times J^2 dv \quad (6)$$

で計算される。ここで

$\sigma$  : 電気伝導率

$dv$  : 微小体積

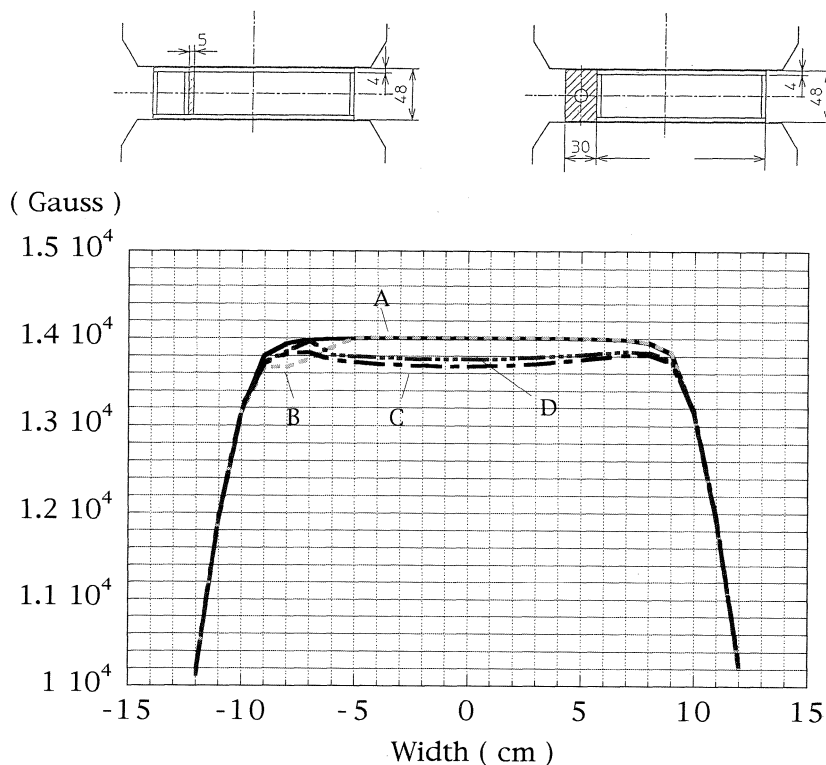
である。(6)式を積分し、1パルスあたりの発熱量を求めると

$$Q = 5.1 \text{ (J/m)}$$

でリング全体では約19.23Wになるが、真空性能等に問題はない。しかし、渦電流によってダクトに電圧が誘起される為に各偏向ダクトにはセラミックリングを溶接しリング全体に電流が流れない様にしてある。ただし、他のリングの様なショートコンデンサーは入れていない。

#### 4.2.2 渦電流の効果について

計算は偏向ダクトのSUS板厚を3mmと4mmとして、水冷却部のSUS板に5mmのCu板を付けた時と水冷却部に30mm角のCuブロックを置いた時の磁場の乱れを計算した。この結果を第3図に示す。中心部の磁場はダクトを挿入すると約320G低くなる。また、ダクトにCuブロック水冷却管(30mm厚さ)を付け場合には磁場の乱れが大きくなり採用できない事が解る。本計算の結果からCuの厚さは薄く、且つ、冷却効率を低下させない1mm厚さとした。



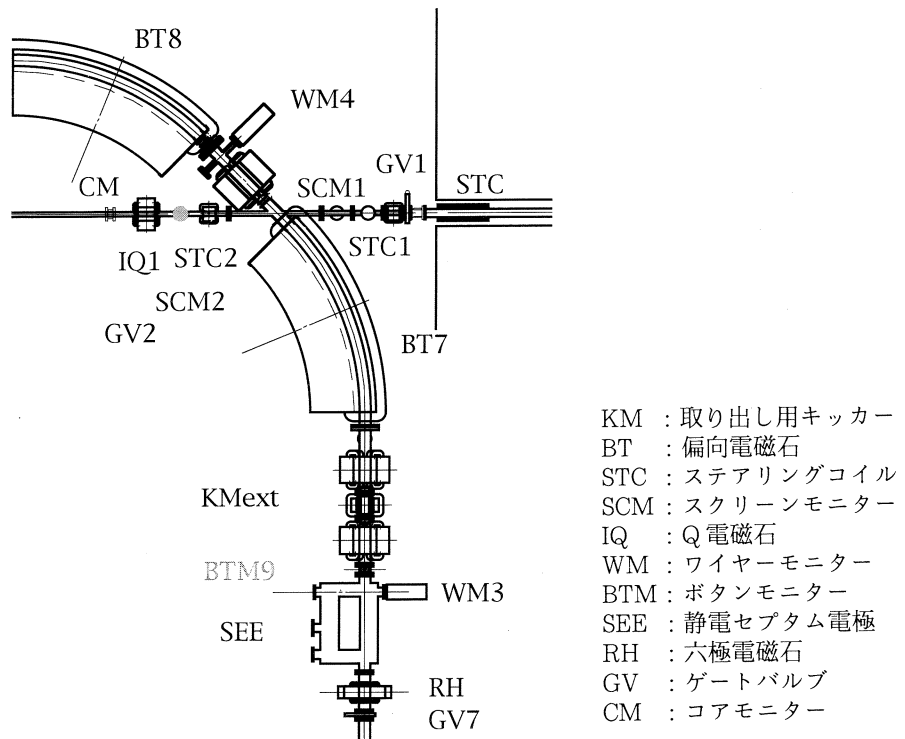
第3図 偏向電磁石の磁場とダクトによる渦電流効果。  
ダクトの材質と厚みが偏向磁場に与える影響を示す。

## § 5. 入射ビームへの漏れ磁場の影響

### 5.1 入射部ダクトの形状

入射ビームはSTBを周回するビームと同一の軌道で交叉する。このダクトの概略図を第4図に示す。ビームは偏向ダクトの中心軌道に対して $45^\circ$ の角度で入射する。この偏向ダクトは入出射ビームダクトと四極電磁石用ダクトを接続するフランジが45度に溶接された複雑な構造で製作精度を出す事が非常に難しい形状をしている。さらに、複雑な形状をしている為にフランジ接続部の放射光入熱対策が取りにくい。

しかし、現時点では周回している電流強度が弱い為に問題は発生していない。



第4図 入射部ビームライン付近の概略図。

### 5.2 漏洩磁場の影響

入射ダクトが偏向電磁石コイルの、どの位置を通過するかによって漏洩磁場強度が大きく異なる。

設計当初、計算は資料の関係から加速エネルギー1.2GeVの時の磁場を1.4T、入射電子ビームのエネルギーを230MeVと300MeVと仮定し、その漏洩磁場の影響を求めた。漏洩磁場は偏向電磁石の磁極角から(45度方向)ビーム軌道中心までの距離を、95mmと130mmとして求

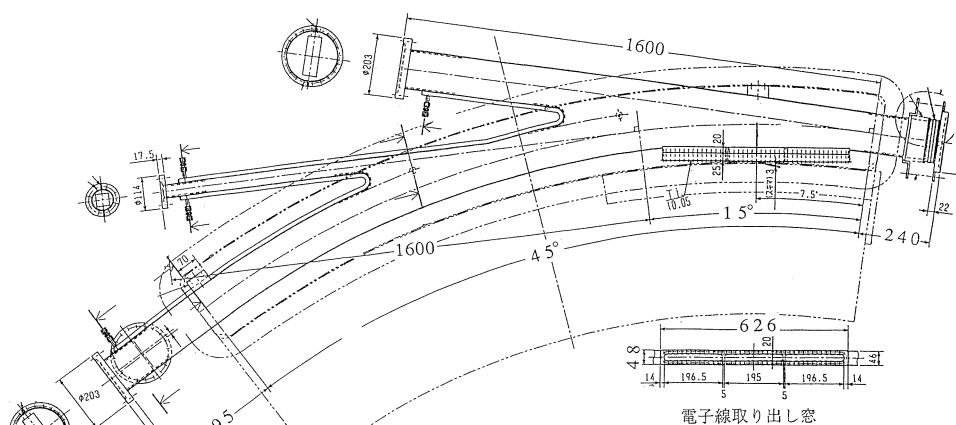
めた。この結果、偏向電磁石の磁極角から95mmの間隔点で300MeVの時に約360G、230MeVの時に約210Gの漏洩磁場が発生する。また、コイル中のダクトの長さ（漏洩磁場中を通過するビーム距離）を200mmとしてビームの曲角を求めた。しかし、実際はビーム入射時に偏向電磁石の磁場は3375G（300MeVの時）に低下しているので、残留磁場を上記の1/4として曲げ角を求めた。この磁場からエネルギーに対して、次の様な曲りが生じる。

	300MeV	230MeV
95mm	0.73mm	0.94mm
130mm	0.413mm	0.5mm

その後、設計が進むにつれて入射ビームダクトの関係で、磁極からの距離を50mmまで近づける必要性にせまられた。この点での曲げ角を上記の結果を外装し求めると、約3.2kGの残留磁場で入射ビーム230MeVの時に約2.1mm方向が変わる事が解った。この対策として入射ダクトに5mmの差（出射側をビームに乗って右側）を付け、入射ビームダクト側とダクト交叉部下流ダクト側にそれぞれステアリングコイル（STC）を設置してビーム軌道を修正することにした。その後、ビーム試験の結果は真真空的にもビーム軌道共に問題はない。しかし、漏洩磁場の影響は大きく入射ビームのサイズを極力、小さくする様に調整しなければならない。

## § 6. Tagging 実験用偏向ダクト（BM4）の仕様

同実験はBM4偏向電磁石の直前に針状のターゲット（C， $7\mu\text{m}\phi$ ，長さ20mm）をビーム軌道に5秒間に1回挿入し、 $\gamma$ -線をBM4ダクトの0度方向に取り出すポートと電子線



第5図 Tag. 実験用偏向ダクトの構造図。



(約400MeV から1.2GeV) を観測する為にダクトの内側に7.5度を中心とする幅600mm ×高さ20mm の Ti窓を取り付けた構造のダクトとした。ダクトの概略図を第5図に示す。尚, BM 4ダクトには15° 方向にSOR を取りだすポートが追加されている。

### 6.1 窓の厚さと材質

窓の形状を600mm 幅×20mm 高さにした場合, 窓の材質と厚さについて検討した。ビームが窓に入射する角度は45° ~30° となり, effectiveな厚さは窓の厚さの2倍となる。更に, 約50mm だけ空气中を飛行して検出器に入射する。この条件は800 $\mu$ m で1MeVのエネルギー分解能に相当する。ビームの拡がりを500keVに抑える様に設計した。測定上は400 $\mu$ mの拡がりとしたい。

#### 6.1.1 窓の材質

各材質の基礎資料を示す。

	$X_0$	$2/X_0$ (effective)
Ti	3.56cm	$2.8 \times 10^{-3}$ (50 $\mu$ m), $5.6 \times 10^{-3}$ (100 $\mu$ m)
Al	8.9cm	$2.25 \times 10^{-3}$ (100 $\mu$ m), $4.49 \times 10^{-3}$ (200 $\mu$ m)
Fe (SUS)	1.76cm	$2.8 \times 10^{-3}$ (25 $\mu$ m), $5.7 \times 10^{-3}$ (50 $\mu$ m)

この値を基にして, Multiple scattering の公式

$$\theta_0 = (14.1\text{MeV}/\beta cp)Z\sqrt{x/X_0} \cdot (1+1/9\ln(x/X_0)) \quad (7)$$

から

$$\Delta Y1 = 1/\sqrt{3} \cdot x \cdot \theta_0 \text{ (媒質内での位置の拡がり)}$$

$$\Delta Y2 = \theta_0 \times 50\text{mm} \text{ (50mm 飛行して検出器に入る時の位置拡がり)}$$

$$p = \text{入射電子の運動量}$$

$$x/X_0 = \text{通過する物質厚さを輻射長で表したもの}$$

でビームの拡がりを求める。この内, 分解能に影響するには $\Delta Y2$ である。

例として, Ti50 $\mu$ mの時の $\Delta Y2$ を計算する。 $e^-$ の運動量を100MeVとする。

$$\begin{aligned} \theta_0 &= (14.1\text{MeV}/\beta cp)Z\sqrt{x/X_0} \cdot (1+1/9\ln(x/X_0)) \\ &= 14.1/(0.997 \cdot 100)Z \times \sqrt{2.8 \times 10^{-3}} \times [1+0.038\ln(2.8 \times 10^{-3})] \\ &= 5.6\text{mrad} \end{aligned}$$

$$\Delta Y2 = \theta_0 \times 50\text{mm} = 280\mu\text{m}$$

$$\Delta Y1 = 1/3 \times 50\mu\text{m} \times 5.6\text{mrad} = 0.2\mu\text{m} \text{ で無視できる。}$$

この事から

Ti	75 $\mu\text{m}$
Al	150 $\mu\text{m}$
Fe	30 $\mu\text{m}$

程度が窓の厚さの限界と考える。もし、窓の材質として Al150  $\mu\text{m}$  を使用した場合、 $\theta_0=7.26$  mrad,  $\Delta Y2=363 \mu\text{m}$  となり、Ti窓よりも拡がりが大きくなる。

以上の計算結果を基にして窓の材質、厚さ、検出器との距離等を選定しなければならない。現実的な問題として、検出器の性能は空間分解能 1 mm, 電子エネルギー換算で平均600keV 程度が予想される。

### 6.1.2 取りだし窓の機械的強度

Tag. 用偏向ダクトは $\gamma$ 線取り出しポート, SOR 取り出しポート, 電子線取り出し窓を付けた構造になっている為に、ダクトの板厚 4 mm ではダクトの中心部での変位量が大きくなる。三次元構造解析で全体の最大変位量を計算した結果、ビーム電流に影響しない様に各ポートの取り出し付近に 5 mm  $\phi$  の支柱を建てた。また、電子線取り出し窓のフレーム厚さを 10mm にしても支柱が無い場合には約 2.9mm 歪む事が解った。窓に支柱を 200mm 間隔で 2 箇所に取り付けた場合、最大変位量は 0.1mm となる。この結果から窓に支柱を建てる事にしたが窓のフレーム厚さと支柱の為に測定不能領域が生じる結果となった。

### 6.1.3 電子取りだし窓の支柱の影響

窓の支柱厚さを 10mm と 20mm にした時の測定不可能な領域について検討した。

#### 1. 条件

$$E_0 = 1.2 \text{ GeV}$$

$$E_\gamma = 1.1 \sim 0.8 \text{ GeV}$$

$$\text{支柱の大きさ } 5 \times 10 \text{ mm と } 5 \times 20 \text{ mm}$$

ただし、ビーム軌道の中心に支柱がある場合を想定する。

#### 2. 結果

上記の計算から上流に位置する支柱は

	測定不能領域
10MeV (10mm の場合)	1.045~1.033GeV
20MeV (20mm の場合)	1.045~1.022GeV

の範囲が測定不能領域となる。

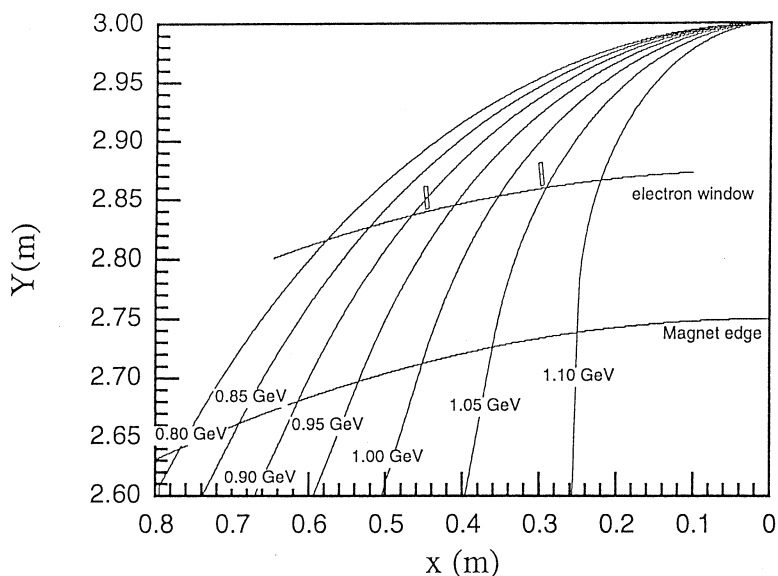
また、下流に位置する支柱は

	測定不能領域
20MeV (10mm の場合)	0.918~0.897GeV
40MeV (20mm の場合)	0.918~0.877GeV

に於いて、測定不能領域が生じる事になる。

### 3. 結論

以上の結果から測定が可能な範囲である300MeV の内、支柱の影となる測定不能範囲は支柱の幅が10mm で約10%，20mm で約20%となる。よって、下流側は40MeV (20MeV) まで測定不能になる事から、 $E_0$ を50MeV だけ下げることがある。検討の結果、窓の安全強度を考慮して幅5 mm の支柱を窓の2箇所に取付けた。このダクトの支柱による測定不能範囲の計算結果を第6図に示す。



第6図 電子線取り出し窓の幅と測定不能範囲。  
横軸にビーム入射位置からの距離に対して縦軸にビームに  
垂直な方向の距離を示す。  
図中の四角部が支柱でこの範囲が測定不能となる。

#### 6.1.4 Ti窓の真空シール材

Ti板の問題点は表面に極微小のグリーン溝があるために微小リークが起りやすく、溶接性が悪い事にある。この為に真空シール材はTi板に密着性が良い物を選ぶか又はTi板に食い込む(例、ナイフェッジフランジ)方式を採用する必要がある。しかし、電子線取り出し窓の

材質としてはエネルギー減衰量が小さく、真空特性が良好であり、耐久性、耐食性に共に優れてる事が要求される。結局、この条件から Ti 箔を窓の材質として選定した。Ti 箔の真空シール方式は種々試験した結果、窓のシール材として In 線(1 mmφ)を採用することにした。

### 6.1.5 真空試験結果

In 線(1 mmφ)を使用した場合の締め付けトルクとリーク量

締め付けトルク (kg・cm)	リーク量
30	$2 \times 10^{-8}$ Torr・l/sec 以下
40	$7.7 \times 10^{-9}$ Torr・l/sec 以下

以上の結果から、窓の真空シールは In 線を Ti 板にフランジで締めつける構造とした。

## § 7. 真空仕様電磁石及び電極用大型真空槽の構造と真空シール材の検討

静電セプトマグネット (SEE) 及びセプト電磁石 (入射: SMI, 取りだし: SME, パルス: SMP) の各マグネット用真空槽は箱形 (約 1 ~ 2 m × 0.6 m × 1 m) とした。真空シール材はガス放出量が少なく耐放射線性に優れ、低価である事が要求される。これまでの実績から金属 O-ring 又は金線について検討した。当初、これまでの実績から真空材料として金線を考えた。金線はアルミニウム合金製大型真空槽に実用化されており、再生可能、低価格である点を考慮したが製造側の体制が整わず、残念ながら見送らざるを得なかった。一方、金属 O-ring は高価 (本器で約 40 万円/1 本程度)、且つ表面の傷やホコリ等に弱く真空リークが発生しやすい欠点があり、その取り扱いに熟練を要する。また、フランジ溝の加工精度 (3.2s 以下の荒さ) と十分な締め付けトルク (250 ~ 300 kN/m) 管理が要求される。しかし、製造期間の関係で金属 O-ring を苦汁の末に選択した。

## § 8. セラミックダクトの内面コーティング

主にセラミックダクトは KM 用に使用される。内面コーティングはチャンバー内面の壁電流がスムーズに流れる様に導電性を持った Ti N 被膜を真空蒸着法で成膜した。膜厚は KM 電磁石の立上げり時間が速い為に、渦電流による磁場の変化を抑える場合には非常に薄いコーティングをする必要がある。しかし、ビームを蓄積しているモードではイメージ電流による発熱が生じる。同様に、磁場が変化している場合には渦電流による発熱がおこる。

### 8.1 ダクトの膜厚

渦電流による磁場  $B$  の変化は次の式で近似される。

$$\Delta B/B = 2a \cdot d / (\pi \cdot \delta^2) \times (1 - b/a \cdot \tan^{-1}b) \quad (8)$$

ここで

$a$  : ダクト幅

$b$  : ダクトの高さ

$d$  : 膜厚

$\delta$  : スキンデップス

を表す。磁場が時間に直線的に変化する場合には  $\delta$  は

$$\delta = ((\Delta B/B) \times \sigma \times \mu / 2)^{-1/2} \quad (9)$$

で表される。ここで

$\sigma^{-1}$  : 比抵抗 (TiN :  $2.2 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ )

$\mu$  : 透磁率

を示し、(9)式から膜厚を概算すると KM の磁場の立上げ時間から約46nm と推定される。しかし、膜厚は炉と材料の余熱がある為に一定にする事が難しい。さらに、ダクトの形状がレーストラック型である為に長辺部と R 部では膜の厚さが  $3 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$  とばらつきが生じる。また、膜厚さの測定限界は  $0.05 \mu\text{m}$  程度であった。本装置では、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 比重3.8) 製セラミックチャンバー (巾100mm, 高さ40mm, 長さ300mm のレーストラック型) の内面に TiN 被膜を  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  蒸着した。メーカーの資料によれば蒸着時間を 5 秒程度にした場合、抵抗値は

$$R = 360 \Omega$$

となっている。このコーティング膜厚の抵抗はイメージ電流に影響しダクトの発熱となる。種々、試験を行った結果、膜の厚さよりも抵抗値からコーティングの厚さを決定することにした。リングに組み込んだダクトの抵抗値は約  $1 \text{k}\Omega$  が得られた。

## § 9. ビーム輸送系の設計

輸送系 (約50m) は STB から取り出されるビームエミッタンスを  $1 \text{mm} \cdot \text{mrad}$  として設計されている。輸送系は STB リングから得られるエネルギー300MeV, 平均電流が約  $3 \mu\text{A}$  の電子ビームを LDM 及び Tagging 電磁石 (第一実験室) に送る。また、コヒーレント放射光実験等の場合にはパルスビームをビーム偏向室に直接、取り出し可能な構成とした。真空系の構成は総排気容量  $1,800 \text{l/s}$  (IP =  $150 \text{l/s} \times 8$  台, TMP =  $300 \text{l/s} \times 2$  台) に大気開放用超高純度  $\text{N}_2$  ガス導入機構を各粗排気系の 2 箇所接続した。ダクトの材質はガス放出量と残留放

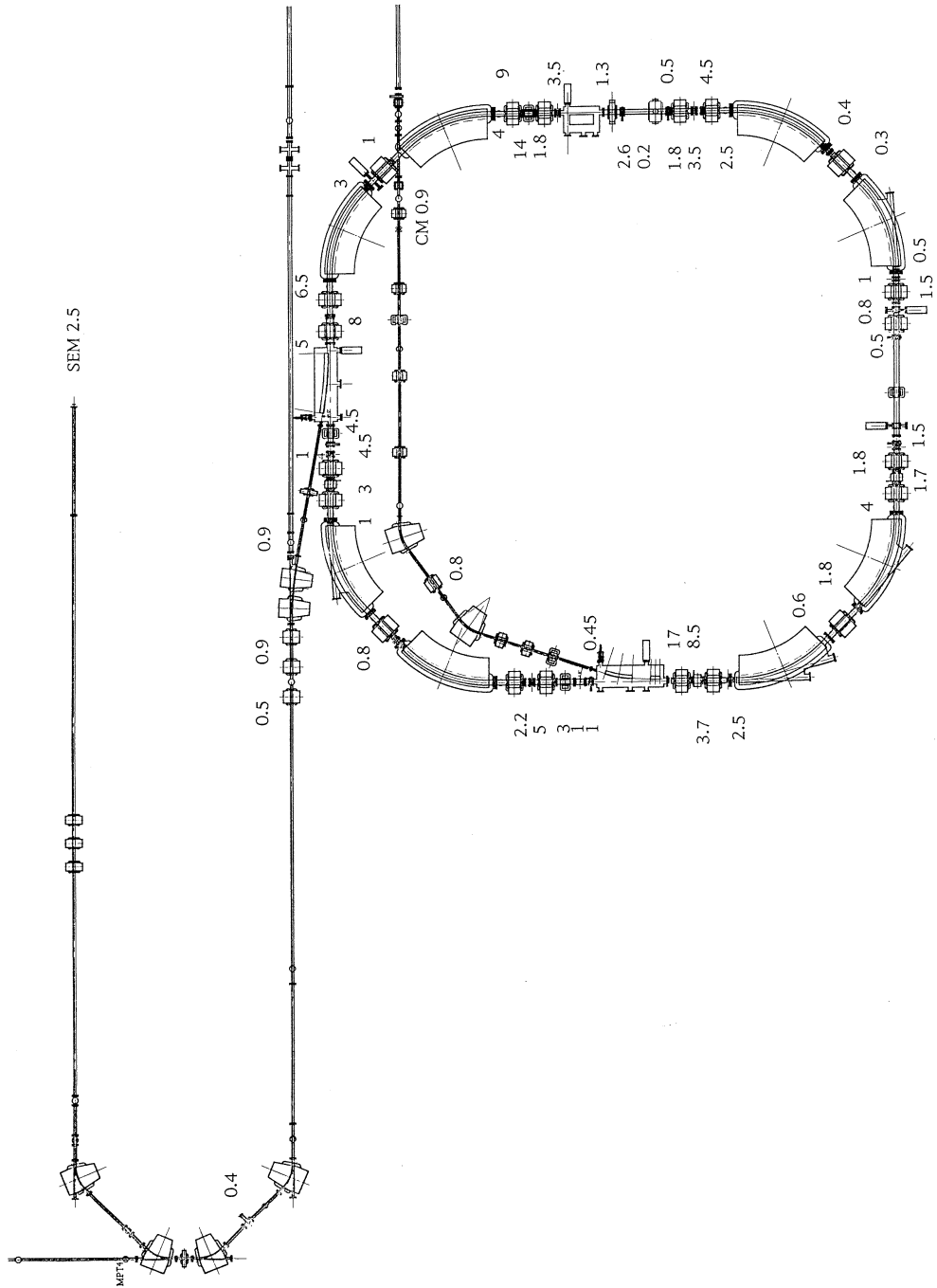
射能強度の軽減，組立易さの点から A6063の引き抜きパイプを使用した。又，ビームラインはビームの拡がり を考慮して偏向電磁石 TM 1 までを60φ，TM 4 から電子線スペクトロメータ LDM までを80φとした。しかし，偏向電磁石のポールピースのギャップは電源容量の関係から30mm と狭く，結果として偏向ダクトの内径を24mm と狭くせざるを得なかった。今後，輸送系で発生するバックグラウンドの軽減策を検討する必要がある。また，Tagging 実験用として偏向電磁石 TM 1 と TM 2 間にスリットを設置した。このスリットは旧 V 系で使用していた流用品でビーム電流が数100nA を越える場合には発熱が大きくなり水冷却を必要とするが構造的に出来ない。尚，輸送系ダクトの接続フランジは各真空部品を考慮して ICF152を採用した。しかし，ダクトが細いために，IP 排気口でのコンダクタンスは排気速度の約半分に低下する。本来，ポンプの排気速度はダクトのコンダクタンスから求めるべきであるが，契約の関係で適正な排気速度のポンプを選定出来ず STB 本体と同様の機種（150 l/s）を採用した。又，第一実験室への旧 V 系のビーム輸送系(50m，材質 A6063) との接続は完了しており，保持ポンプ60 l/sIP 4 台と粗排気装置250 l/sTMP 2 台で  $P = 2 \times 10^{-8}$  Torr以下の圧力に保持されている。

## § 10. 総 論

現在，ストレッチャー・ブースタリングの試験運転を繰り返している。しかし，蓄積電流値はキッカー電磁石の立ち下り時間が設計値よりも長く，3ターンインジェクションができず電流値を大きくする事ができない。また，加速エネルギーは偏向電磁石の電源の調整に手間取り903MeV までしか試験をしていない。第2図に示した様に蓄積電流とエネルギーが低いために系内の圧力は平均  $2 \times 10^{-8}$  Torr 以下を示している。

以下に，これまでの運転経過についてまとめる。

- 1) 真空仕様電磁石及び電極用の大型真空槽の圧力は IP と TMP を併用しても  $1 \times 10^{-7}$  Torr 台で，他の真空系よりも1桁以上大きい。また，これら3箇所を設置したコールドカソードゲージの圧力が加速試験運転時に  $1 \sim 3 \times 10^{-7}$  Torr 台の速い圧力変動を観測しているがその原因は突き止められていない。
- 2) 入射ビームと周回ビームが交叉する入射部での圧力変化（IP 電流値）は観測されていない。
- 3) 残留ガス分析器で測定した結果，ハイドロカーボン系のピークが高く，洗浄不足が認められる。今後，静電セプトム電極（電極 OFHC）等の汚染が懸念され，耐電圧の低下に



第7図 ストレチャーブースタリング及びビーム輸送系のダクト表面残留放射能強度 ( $\mu\text{Sv/hr}$ )。

注意する必要がある。

- 4) アルミニウム合金製ダクトを使用している入射部及びビーム輸送系はガス放出量が低く、STB本体の圧力よりも1桁低く、平均 $2 \times 10^{-9}$  Torr台を保持している。一方、実験装置間に2桁以上の圧力差(実験装置系 $10^{-7}$  Torr台)が生じており、今後、差動排気系を設置しなければならない。
- 5) 調整を開始してから約5ヵ月になるが、SUSを使用したSTB本体の残留放射能強度は僅かなら上昇してきている。今後、モニター系の整備が重要となるが、設置する空間が足りない。現在の表面線量を第7図に示す。測定は試験終了の約100時間後に $\gamma$ -Survey Meter (Aloka社, TCS151型)でダクトの表面線量( $\mu\text{Sv/hr}$ )を測定した。
- 6) 試験中の放射光による真空圧力の変化を測定した結果、約1桁程度の圧力上昇を示している。また、発熱による放射光観測窓(ガラス製)の破損の危険性があり、その対策を急いでいる。

今年後半から共同利用が再開されるが、まだ、調整段階にあり、設計仕様どりの性能が出せるかを判断するにはもう少し時間経過をまたなければならない。

#### 参 考 文 献

- 1) O. Konno and T. Ohoi : JVST A, **9** (1991) 3134 ;  
T. Ohoi and O. Konno : JVST A, **12** (1994) 3186.



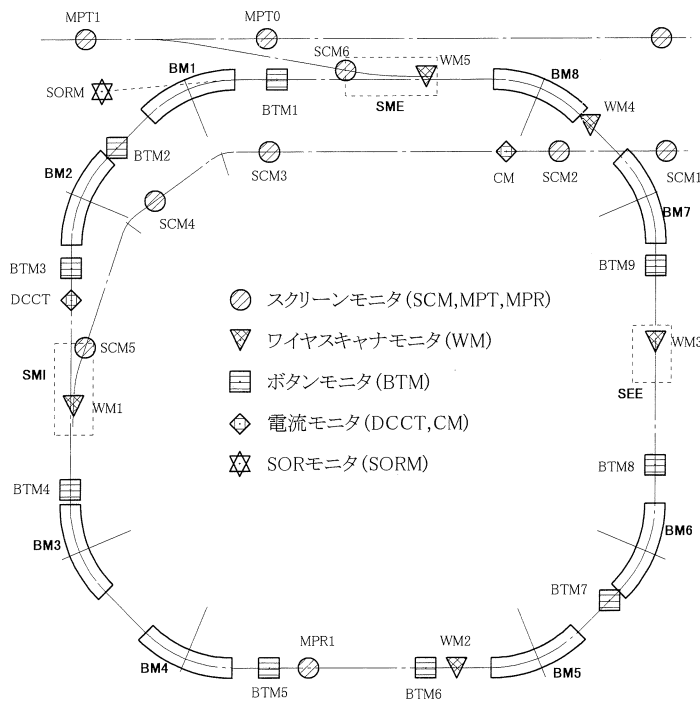
# ストレッチャー・ブースタリングのビームモニター系

核理研

柴崎 義信

## § 1. はじめに

ストレッチャー・ブースタリング (STB リング) のビームモニターには、使用目的および使用場所により、複数のモニターを使用している。リングへの入射ラインおよび取り出したビームのラインにはスクリーンモニターを設置した。また、入射ビームとリングのマッチングを簡単にするため画像処理による診断を行えるようにしている。リング内のモニターとしては入射直後の数ターンの軌道調整用に、位置を変化できるスクリーンモニターと、ワイヤスキャナモニターを用いる。可変範囲はリングの真空ダクト内径の120mmが必要である。ビーム蓄積時の位置検出にはボタンモニターを使用する。位置の検出範囲は横方向および高さ方向ともに±20mmとした。それぞれのモニターの配置を第1図に、特徴を以下に示す<sup>1, 2)</sup>。



第1図 STB リング・ビームモニターの配置。

## § 2. モニタ

### 2.1 スクリーンモニタ

スクリーンモニタは、電子ビームがセラミックス（酸化ベリリウム、マグネシア等）の薄い板を通過するときでる光を観測することによりその位置と大きさをモニタするものである。簡単に目で直接観測できるために広く利用されている。ただし、軌道を遮るため蓄積リングのモニタとしては不適當である。STBリングでは入射、取出ラインの軌道調整及びリング内に入射されたビームの確認に使用している。

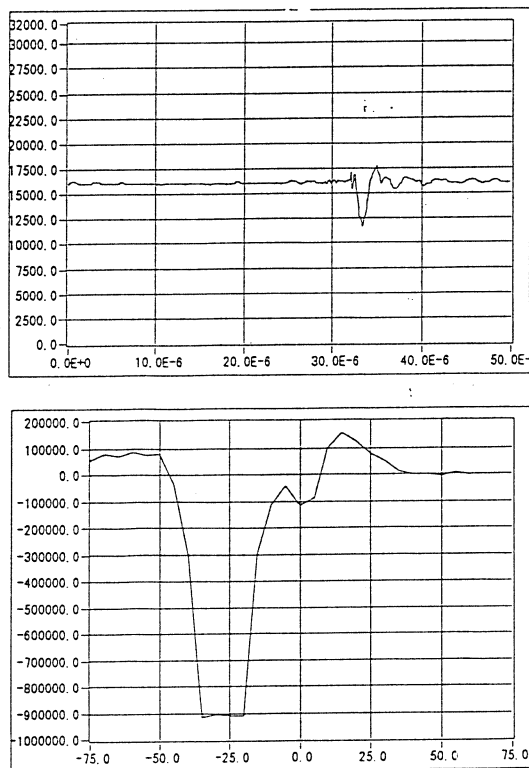
スクリーンモニタの構成としては、ターゲットとそれを上げ下げするための駆動機構、CCDカメラ、画像切換器、画像取込ボードそしてパーソナルコンピュータからなっている。CCDカメラにより映像化された信号はパーソナルコンピュータに取り付けた画像取込ボードによりデジタル化され、コンピュータ・ネットワークを通じて制御室の操作用コンソールへ表示する。

### 2.2 ワイヤスキャナモニタ

電子ビームがタングステンのワイヤに当たった時に放出される2次電子を測定するタイプのモニタで、ワイヤをビーム軌道を横切るように移動させ位置と大きさを計測する。このタイプのモニタはスクリーンモニタほどのビームロスを生じることはなく、また信号処理の工夫により短い時間ごとの変化を観測することが可能である。ただ、ワイヤの位置を機械的に移動させるため測定に時間がかかるのが欠点である。分解能は、ステージの移動速度によるが最大で0.1 mmを得ることができる。モニタの信号と測定した位置の例を第2図に示す。

### 2.3 ボタンモニタ

リングを蓄積モードで使用する時の位置モニタとしては軌道上にビームロスを生じるようなタイプのモニタを使用することはできない。ボタンモニタは、ビームダクト内面に設置された円形の電極に、電子ビームが通過するときに生じる誘導電圧を測ることにより位置を測定するものである。ビーム軌道を遮ることなく精度良く位置をモニタできるため、放射光リングやブースターリングなどに利用されている。



第2図 ワイヤモニタの信号。上のグラフはワイヤから得られた電流波形（x軸単位は秒）。  
下のグラフはワイヤをスキャンし得られたx方向のヒストグラム（x軸単位はmm，0.0 mmが軌道中心，負の方向がリング中心）。

#### 2.4 電流モニタ

電子ビームの強度を測定するために、コアモニタと、平均電流モニタ（DCCT）を使用している。コアモニタは、フェライトのドーナツ状のコアに数十ターンの巻線をまいたもので、比較的早い周波数の電流をモニタすることができるため、電子ライナックからリングへ入射するパルスビームの電流モニタとして用いている。核理研のパルスラインに使用しているコアモニタでは、直流あるいは非常に遅い周波数の電流を測定することはできない。そのためリング内に蓄積された電流をモニタするためにDCCTを使用した。帯域はDCから数KHz，測定可能電流値は $\pm 100 \mu\text{A}$ から $\pm 5 \text{A}$ ，分解能が $10 \mu\text{A}$ である。

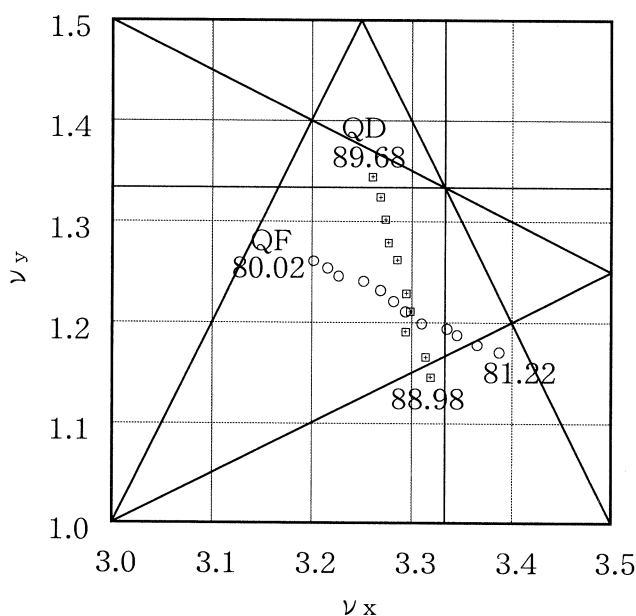
#### 2.5 SORモニタ

電子ビームが磁場により曲げられたときに生じる光をTVカメラを用いて観測し形状と強度

をモニタする。比較的少ない電流でも観測できるため初期の調整には有効である。しかし、蓄積電流が大きくなるにしたがい発生する光の強度が増し、取出窓、フィルターあるいはミラーなどへの負荷が大きくなる。そのため、光を取り出すラインを工夫する必要がある。

### § 3. さいごに

以上5種類のモニタのほかに、シンチレータをリング真空ダクトの周辺に取り付けロスモニタとして使用した。また、ワイヤスキャナモニタとシンチレータ及び放射光モニタとフォトマルを組み合わせチューンを測定した。チューンは、シンチレータ及びフォトマルの出力をFFT処理し得られた周波数を解析することにより測定できる。結果を第3図に示す。



第3図 測定したチューン。□は、QFの値を89.22Aに固定し、QDを88.68Aから91.08Aまで変化させたとき。○は、QDの値を89.68Aに固定し、QFを80.02Aから81.22Aまで変化させたとき。

### 参 照 文 献

- 1) 玉江忠明他:核理研研究報告 30 (1997) 81.
- 2) Y.Shibasaki et al.: Proc. 22nd Linier Acc. Meeting in Japan, Sendai, 1997,p.338.

# ストレッチャー・ブースタリングの制御系

核研理

武藤正勝・七尾晶士・柴崎義信

## § 1. 概要

STB 制御系の設計作業<sup>1)</sup>は、STB 建設が始まる前年(1994年)に開始した。少ない予算と少数の人員でハード、ソフトウェアを開発することになったので、かなり厳しい作業となり、制御システムの構築<sup>2)</sup>は予定より遅れたが、ビームテストには何とか間に合わせる事ができた。しかし、未だ出来ていないプログラムもあり、当初の目標としていた制御システムの完成にはもう少し時間が必要である。STB は10月より一部共同利用実験に使われるが、暫くの間はマシンスタディも並行して続けられる予定である。そこで、今回はこれまでの途中報告とし、最終報告は後日改めておこなう予定でいる。

## § 2. 設計目標

制御システムを設計するに当り、以下のような目標と、それらを実現するための方針を決めた。

(1) 信頼性は高く、建設コストを低く抑ええたシステムの実現

性能向上が著しいパーソナルコンピュータ(PC)と、産業の分野で広く使われている PLC (Programmable Logical Controller) を採用する。

(2) 開発、保守の負担を減らしたシステムの実現

オブジェクト指向ソフトウェア技術の採用と、市販の開発ツールやアプリケーション・ソフトウェアを活用して開発負担の軽減化を図る。

(3) 柔軟性や拡張性の高いシステムの実現

データベースを採用し、それを制御の中枢に据えて機器構成や制御機能の変更に対して迅速に対応できるようにする。

コンピュータシステムには、サーバ・クライアント構成を採用し、処理の分散化を図る。

(4) 加速器運転者の負担を軽くするために操作性の良いシステムの実現

コンソール画面の GUI (Graphical User Interface) 機能を強化する。

ビームモニタの映像を画像処理し、ビームの特徴を抽出して表示する。

ビーム軌道を解析・シミュレーションしながら調整出来るようにする。

調整手順をマクロ化して、運転操作の省力化を図る。

オンライン・マニュアルやヘルプに写真、図面などを多く使用し、解りやすい画面構成にする。

#### (5) 技術の急速な進歩によって陳腐化しないシステムの実現

特注品は出来るだけ使わないようにし、いつでも最新のものと交換出来るようにする。

### § 3. ハードウェア構成

加速器制御では制御コンピュータとしてワークステーション (UNIX) が、デバイスコントローラとして CAMAC, VME が広く使われてきた。しかし、最近の PC の性能は飛躍的に向上し、多くの応用分野で PC への移行が広まり、ワークステーションの影が薄れてきている。特に PC の GUI 機能の向上、メモリ、ディスク容量の高密度化、オブジェクト指向に対応した言語・ツールによるソフトウェア開発環境の充実、信頼性の高いマルチタスク対応のオペレーティングシステム (OS) が現れたことなどにより、もはや加速器制御へ PC を利用することに関して何ら問題はない。また、加速器の保守費用の減少化傾向で、PC の低価格化は PC の応用を急速に拡大させると思われる。PLC は FA (Factory Automation) の分野を中心に、産業機器の制御で広く使われている。コンピュータ技術の進歩を反映して、PLC の性能は向上し、ソフトの開発環境も便利になっており、高速性の要求される処理や、多量データを扱う仕事を除けば、加速器制御系では多くの機器制御へ応用が可能である。本システムで PLC は、加速器とコンピュータシステム間のインターフェース及びデバイスドライバとして機能している。

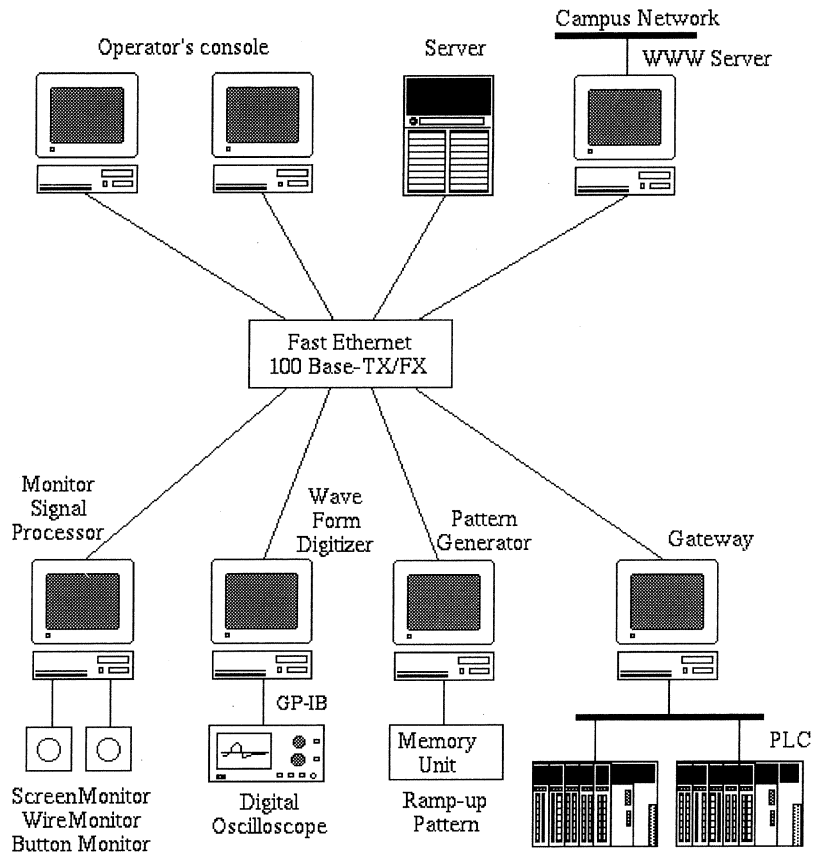
#### 3.1 PCシステム

第1図に制御システムの構成を示す。システムは10台の PC で構成され、それらは専用の Fast Ethernet (100Base-TX/FX) で結ばれている。PC はそれぞれ一つの機能を担い、その役割は、

- (1) 制御の中核機能として働くデータベース・サーバ、
- (2) グラフィック機能を強化したオペレーション・コンソール、
- (3) PLC とサーバ・コンピュータ間のコミュニケーションの役割をするゲートウェイ、
- (4) ビーム・スクリーンの映像をデジタル化してコンソールに送ったり、ワイヤー・スキャ

- ン型ビームモニタとボタン型ビーム位置モニタの信号処理するモニタ信号プロセッサ，
- (5) 波形信号を現場のオシロスコープでデジタル化し，その波形情報をコンソールへ転送する，波形ディジタイザ，
  - (6) ブースタ・モード運転の際，磁場の振り上げを制御する，パターン信号発生器，
  - (7) インターネット上に加速器の運転情報をリアルタイムで提供するWWWサーバ，
- その他である。

PCのOSとしてはマルチタスク機能を備え，サーバ・クライアント構成による分散処理が可能で，更にネットワークとの接続性が優れていることなどから，サーバPCにはWindows NT Server，クライアントPCにはWindows NT Workstationを採用した。



第1図 STB 制御システムの構成図。

### 3.2 PLC システム

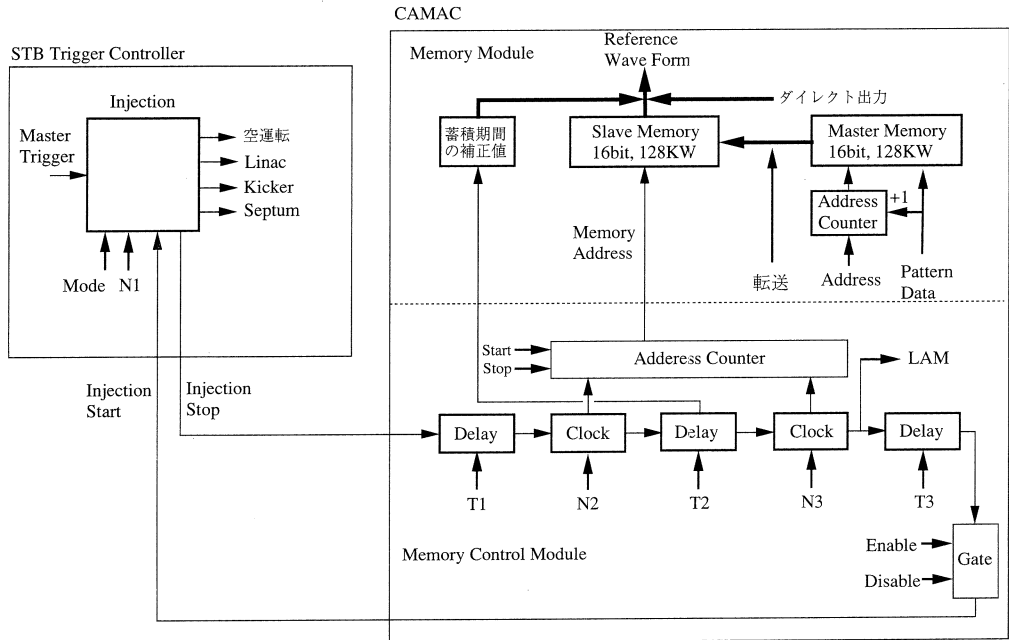
PLC はオムロンの CV500 シリーズを採用した。このシリーズの基本命令実行時間は  $0.125 \sim 0.375 \mu\text{s}$ 、制御点数は最大 1,024 点で主に大規模システムを対象にした機種である。PLC モジュールには Digital Input (64bit), Digital Output (64bit), ADC (12bit, 8channel), DAC (12bit, 4channel), GP-IB, RS-232C, RS-422 のモジュールを使い、電磁石電源、RF システム、真空システム、ビームモニタを制御する。小型の電磁石電源は GPIB で制御及び電流の読み取りをおこない、大容量の電磁石電源は 12~16 ビットのデジタル信号で制御し、電流はデジタル電圧計を使い GPIB で読み取られる。真空系の真空ゲージのモニタには RS-232C、イオンポンプ電源の制御には RS-422 を使っている。PLC のネットワークはメーカが提供しているトークンバス方式 (伝送速度 2 MHz) で、副制御室、第二実験室、STB 電源室に設置した 8 台の PLC がつながっている。ゲートウェイ・コンピュータは PLC ネットワークと Fast Ethernet 間のプロトコル変換をおこなっているが、パソコンから PLC を制御するためのドライバソフトは、開発を始めた頃 Windows NT 対応版が PLC メーカから提供されていなかったため、我々がドライバプログラム<sup>3)</sup>を開発した。

### 3.3 パターン信号発生器

ブースタ・モード運転では、200MeV で入射したビームを 1 秒間で 1.2GeV まで加速する。パターン信号発生器は、振り上げ電流波形を偏向電磁石、4 極電磁石 (QC, QF, QD) 電源に与えて磁場をコントロールする。第 2 図にパターン信号発生器のブロックダイアグラムを示す。装置は「STB Trigger Controller」, 「Memory Control Module」, 「Memory Module」で構成される。「Memory Control Module」, 「Memory Module」はいずれも CAMAC タイプのモジュールで、「Memory Module」は各電源と 1 対 1 で接続されている。

「STB Trigger Controller」では、マスタトリガ信号を STB の運転モード (ストレッチャ・モード, ブースタ・モード) と、ブースタ・モード時の STB への入射ビーム数 (N1) をもとに、リニアック及び STB (キッカー電磁石電源, セプタム電磁石電源) へ供給するトリガ信号を制御する。CAMAC の「Memory Control Module」, 「Memory Module」は専用パソコンからインターフェース (Kinetic 2927), クレートコントローラ (Kinetic 3922) で制御される。制御室のオペレーション・コンソールで入力された各電源への波形データは、パターン信号発生器のパソコンで演算処理した後、各電源に割り当てた「Memory Module」のマスタ・メモリ (立ち上り最大 64KW, 立ち下がり最大 64KW, 時間でそれぞれ 6.4 秒分) に一旦書き込



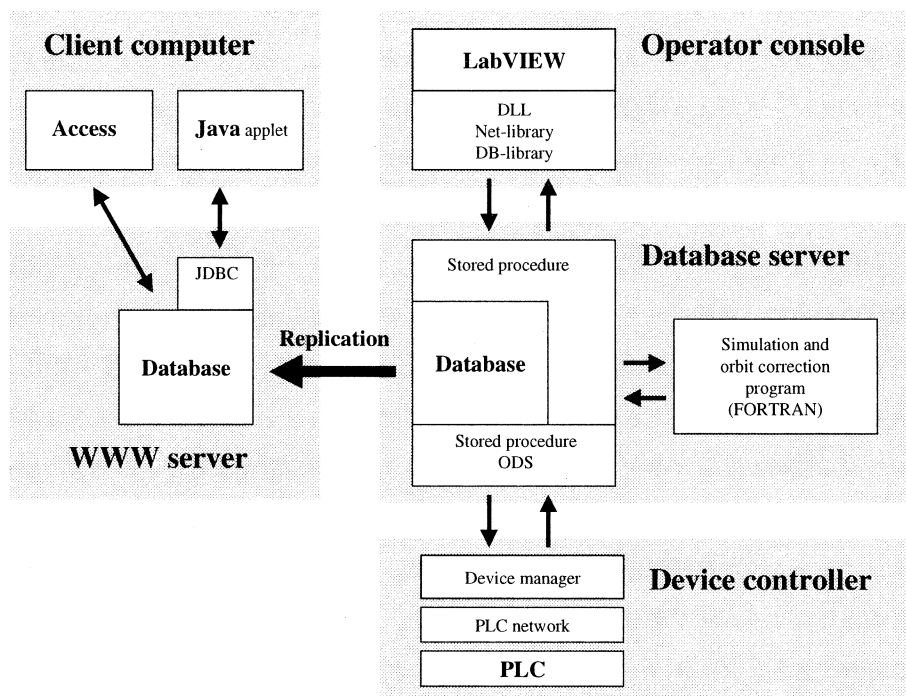


第2図 ブースタ・モード運転の磁場振り上げパターン信号発生器のブロックダイアグラム。

まれ、ビーム入射の直前にスレーブ・メモリに転送される。スレーブ・メモリ内のデータは、「Memory Control Module」からの読み出し信号で $100\mu\text{sec}$ 毎に取り出され、16ビットのデジタルデータとして、各電磁石電源に与えられる。「Memory Control Module」は、ビーム入射から振り上げ開始までの遅延時間 (T1)、立ち上げ時間 (N2)、蓄積時間 (T2)、立ち下がり時間 (N3)、立ち下がり完了から次のビーム入射までの遅延時間 (T3) で制御信号を作り、5台の「Memory Module」の同期をとる。これらのパラメータはオペレーション・コンソールから随時変更が可能である。その他、「Memory Module」には、メモリを介さずにパソコンから直接データを電磁石電源に出力するダイレクト出力 (ストレッチャ・モードで使用) 機能と、振り上げ状態 (蓄積期間) で電磁石電源の出力電流を微調整できる機能も備わっている。

#### § 4. ソフトウェア構成

システムのソフトウェア構成を第3図に示す。システムは最上位のマン・マシーンインターフェース層と最下位のデバイスコントロール層、中間層としてデータベースを用いた制御層から成る三層構造で、すべてのクライアント PC はデータベースの仲介で相互のコミュニケーションを取っている。



第3図 制御システムのソフトウェア構成図。

#### 4.1 制御データベース

加速器が大型になり運転が複雑化してくると、柔軟性に富んだ制御システムが求められ、データベースの役割が重要視されてきた。最近、加速器制御でデータベースの利用は一般的になってきたが、しかし単なる運転記録の格納に使われている場合が多く、制御の中核で積極的な役割を果たしている例はまだ少ない。我々は柔軟性や拡張性の高い制御システムを構築する上で、データベースは極めて重要であると考え、データベース<sup>4)</sup>を制御の中心に据えたソフトウェア体系を考えた。データベースに求める要件としては、

- (1) リアルタイム処理で使える高速性、
- (2) アプリケーション・プログラムとの接続が容易なこと、
- (3) 機能の拡張が容易なこと、
- (4) サーバ・クライアント構成が実現できること、
- (5) OSとの親和性がよいこと

などで、これらの要求に合致するものとして、MS-SQL Serverを採用した。

MS-SQL Server はリレーショナル・データベースであるが、ここではデータベースが持っている機能のひとつであるストアードプロシージャを利用し、それにオブジェクト指向プログラミングのメソッドのような役割を与え、データのカプセル化を図った。オペレータ・コンソールやデバイスコントローラからデータベースへのアクセスは、全てこのストアードプロシージャを通じておこない、データへ直接アクセスすることを禁止している。これで誤ったアクセスで、制御システムの致命的ダメージが避けられる。ストアードプロシージャだけで対応できない処理のために、処理プログラムをデータベースの中に組み込み、データベースの一部として動作させる ODS (Open Data Services) を利用し、データベース機能を拡張・強化してシステムの柔軟性を一段と向上させた。その結果、アプリケーション・プログラムとストアードプロシージャ間のコミュニケーション形式 (プロトコル) を定型化することができ、プログラマが SQL (Structured Query Language) やデータベース構造を知らなくても、データベースとコミュニケーションが簡単にできるようになった。第 4 図に定型化したプロトコルの例を示す。このようなメッセージをデータベースに送ると、指定した機器 (電源) の値 (電流) を変えることができる。又、メソッドを "Get" に換えると、アプリケーション・プログラムは機器の動作値を得ることができる。

**Communication**

```

Class Object, Method [, Property [, Value1 [, Value2, ]]]
stc ISC01, Set , X_current , '-2.5'

Class (Procedure name)      : stc (steering coil)
Object (Device name)       : ISC01
Method (Action)             : Set
Property or Attribute      : X axis current
Value (Current)            : -2.5 (A)

```

第 4 図 定型化したデータベースとアプリケーション間のプロトコル例。

#### 4.2 ツールソフトウェアの応用

今回の制御システムでは、LabVIEW, Access, Excel といった市販のツールソフトウェアを使用した。市販のソフトウェアは完成度が高く、汎用性があるため多様な使い方に対応でき、少人数で短期間にシステムを開発する場合有効である。また、将来ソフトウェア・メーカーから

バージョンアップ・サービスによる機能の追加が受けられ、今後コンポーネントウェアなどの新しいソフトウェア技術の導入も容易になる。

LabVIEWにはメータ、ボタン、ランプ、スライドボリュームなどの優れたGUI機能があり、これらパーツを運転手順に従って体裁よく並べ、動作のブロックダイアグラムを作れば、プログラムを直接組むことなくコンソール画面が簡単に作成できる。コンソールとデータベース間のコミュニケーションには、通信スピードを上げるためODBC (Open Database Connectivity) の代わりに、専用(自作)のDLL (Dynamic Link Library) を使っている。LabVIEWはコンソール以外に波形信号をデジタル化するPCでも使われている。加速器の運転では、パルス動作している機器の電圧・電流波形、ビーム波形など多くの波形情報が必要で、このシステムでは観測したい波形情報は、現場に置かれたデジタル・オシロスコープから GPIB で PC に取り込まれ、ネットワークを通じて制御室へ送られて、コンソール画面上に描かれたオシロスコープに波形が表示される。こうした仕組みも測定器メーカーから提供されている LabVIEW 用のドライバ・ライブラリを使うと短時間で作成することができ、信号源から制御室まで多数の同軸ケーブルを敷設する必要がない。コンソールの画面では4チャンネルの波形が毎秒2回の割合で更新されている。

Excel は STB のブースタ・モード運転時に電磁石の振り上げ磁場パターンデータの入力に、Access は運転パラメータをデータベースへ入力するのに使用している。いずれも VB (Visual Basic) マクロコマンドと ODBC といったツールに備えられている拡張機能の活用で、データベース・サーバとコミュニケーションが取られている。

#### 4.3 WWWでの運転情報の提供

WWW (World Wide Web) は世界中の情報が瞬時に入手できる仕組みと、OS に依存しないオープンなシステムでインターネットを身近なものにした。当初は、情報が送り手側からの一方通行であったが、Java 言語の誕生といった、インターネット関連技術の進歩が、送り手と受け手相互のコミュニケーションによるダイナミックな情報処理を可能にし、最近ではアニメーション、ビデオ画面、音声を利用したいわゆるマルチメディアの情報伝達へと広がりを見せている。我々はこうした最新のインターネット技術を加速器の分野へ応用し、ウェブ・ブラウザを使って、いつでも、どこからでも加速器の運転状態を知ることができる運転情報システム<sup>5)</sup>を構築している。ビームを使って実験しているグループに対しては、時々刻々の加速器の動作情報を提供し、加速器の開発保守グループに対しては、各自の居室や自宅からでも動作状

態が監視できるようにして、最終的には、制御データベース上の運転情報を検索して、必要な情報をそれぞれの要求に応じて表示し、機器の故障診断、或いは異常状態の事前検知に役立つシステムを目指している。

先に述べたように、加速器の運転データは、全てデータベース・サーバに集積される。インターネットから直接このデータベースにアクセスして、必要な情報を確実に入手する方法もあるが、安全性の確保と、データベース・サーバに不要な負担をかけて制御のスループットを悪化させないために、データベース・サーバへ直接アクセスすることを許していない。そこで WWW サーバにも同じ MS-SQL Server を用意し、インターネットから参照するデータはこのデータベースに載せることにした。データベース・サーバ上の一部のデータは、MS-SQL の持っているレプリケーション機能によって、最新の内容が WWW サーバのデータベースに自動的に転送される。このメカニズムは厳密な意味でデータの一貫性の保持ではないものの、許容範囲内での一貫性は保たれている。インターネットから WWW サーバのデータベースへのアクセスでは、万一間違った SQL を発行してデータを壊しても、加速器の運転に何ら影響を与えることはない。

今のところ、真空システムの動作に関する情報<sup>9)</sup>を提供しているが、共同利用の本格的な開始に合わせて、他の情報も検索できるように準備を進めている。

## § 5. まとめ

PC 及び市販のソフトウェアを利用したことで、STB の制御システムは、少ない費用と小人数で建設することができた。大学のような多目的利用の加速器の場合、実験内容に応じて運転モード、ビームの特性が頻繁に変わることから、こうした点に迅速に対処できるシステムが求められる。制御の中枢に採用したデータベースにより、アプリケーション・プログラムの組み込みと、制御機器の構成の変更や制御手順の変更が容易になり、更に PC 間、プログラム間のコミュニケーションもスムーズになり、柔軟性、拡張性に富んだシステムを構築することができた。

## 参 考 文 献

- 1) M. Mutoh *et al.*: *Proc. Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1995* eds. M. C. Crowley-Milling, P. Lucas and P. Schoessow

- (Chicago, 1995) p.926.
- 2) M. Mutoh *et al.*: *Proc. First Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba, 1998* (to be published).
  - 3) M. Nanao *et al.*: *Proc. 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 1997* (東北大核理研, 仙台) p.219.
  - 4) M. Mutoh *et al.*: *Proc. Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1997* eds. Jijiu Zhao and Axel Daneels (Beijing, China, 1997) p.444.
  - 5) M. Mutoh *et al.*: *Proc. The 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 1997* (東北大核理研, 仙台) p.222.
  - 6) URL : <http://www.lns.tohoku.ac.jp/stb/disp2/display2.html>.

## 東北大学300MeV リニアックの改良・保守の30年

核理研

浦澤茂一

### § 1. はじめに

67年5月24日、制御室の台の上の真空管式の8インチ白黒テレビの前、「光った！」と誰かがいった。あれから30有余年が過ぎ、今、ストレッチャーブースターリング（以下、STBと略す）が完成し、改めてリニアックの性能が重要になった。これを機会に各項目ごとに過去の問題点をあげ、それらの解決した経緯を述べ、今後の参考に資したい。まず加速管内でのビームの不安定（BBU）を起こす電流のしきい値の改善、加速管のモード変換器の熱損傷、クライストロンの選定、寿命、クライストロンパルサーの故障の原因究明、部品の使用温度を下げ故障を減らす、誘導電圧調整器がモーターに変身、励振系の変遷、真空管の製造中止、大電力移相器の改良、RF窓破損による真空系への浸水、6フッ化硫黄（SF<sub>6</sub>）ガスの問題、ビーム取り出し窓の改良、ECSの建設と真空リーク、真空系の汚染、ビニールテープでステンレスに穴があく、フロン冷凍機の更新、冷却パイプの継ぎ手の規格、配電線の地絡事故による機器破損、最後に加速器を維持する際、避けられない放射線被曝の軽減について述べる。

建設以来、リニアックで加速されたパルス電子ビームはそのまま各種の研究に用いられてきた。連続した電子ビームの要求が原子核研究者からあり、核理研ではこのため小型のストレッチャーリング（150MeV）を81年に試作し、成功した。95年からこのリングの改造予算が認められ建設に着手した。ストレッチャーモードは300MeVとした。又同じリングで1.2GeVまで加速することが出来、更に研究範囲が広がり、完成が期待された。1.2GeVのブースターモードは将来計画として東北大学放射光計画の放射光リングの入射器としての機能も持っている。STBを含めた全体の構成を第1図に、性能の現在値、当面の目標値、および設計値を第1表に示す。

リニアックに関する参考文献を文末にまとめた。完成した時点での総合報告<sup>1) 2)</sup> 共同利用状況<sup>3) 4)</sup> 94年10月にSTB建設のためシャットダウンする時点での性能<sup>5) 6)</sup> についてはこれらを参照されたい。

第1表 ビーム性能。

	現 在 値	当面の目標値	設 計 値
A 部	60MeV	70MeV	70MeV
	150 $\mu$ A	150 $\mu$ A	300 $\mu$ A
A部+B部	230MeV	250MeV	250MeV
	18 $\mu$ A	20 $\mu$ A	30 $\mu$ A
ストレッチャーモード	200MeV	200MeV	250MeV
	0.5 $\mu$ A	2.4 $\mu$ A	15 $\mu$ A
ブースターモード	1.2GeV	1.2GeV	1.2GeV
	0.5mA *	10mA *	300mA *

\*この値は蓄積値

## § 2. 加速管

### 2.1 ビーム・ブロー・アップ (BBU)

67年5月に加速に成功したとき、SLACと同じビームブローアップ (BBU)<sup>7)</sup> が観測された。この解決策は加速管列に4極電磁石を配置し、ビームを集束することである。加速管列の4極電磁石はA部、B部の間に1組設置されていただけなので急遽、加速管A2、B4の外側に、A4と5、B8と9の間に合計4組取り付け付けた。この結果BBUが起こるビーム電流のしきい値は大きくなった。しかし、設計値には及ばなかった。

この電磁石は間に合わせのもので正確なアライメントがしにくい構造であったため、別の問題を引き起こしてしまった。

### 2.2 三菱重工製加速管のモード変換器

建設当初は三菱重工製の加速管を使用した。このモード変換器はドアノブ型といわれる、マッチング調整ができるタイプである。組立調整時のマッチングは中心周波数でVSWRは1.05以下にできた。

しかし前出の加速管列に設置した4極電磁石のアライメントが正確にできなかったことと、ビーム調整時にステアリングコイルの電流の不適正によりドアノブにしばしばビームを当ててしまった。ドアノブの可動部はステンレスの部分もあり放熱が悪くひどいときには少し溶けたものもあった。溶けないまでも熱変形でマッチングが崩れ再調整をしなければならなかった。これは結構時間のかかる作業である。その手順はまず真空を破り加速管を架台から降ろしVSWR測定装置を取り付けて信号発生器の周波数を少しずつ変え測定しグラフにプロットし、マッチングをとる。しかし変形したものでVSWR1.05以下にならないものがでた。始めは交換していたがたびたびのことで、何か対策を考えなくてはならなくなった。そこでビームの当たり



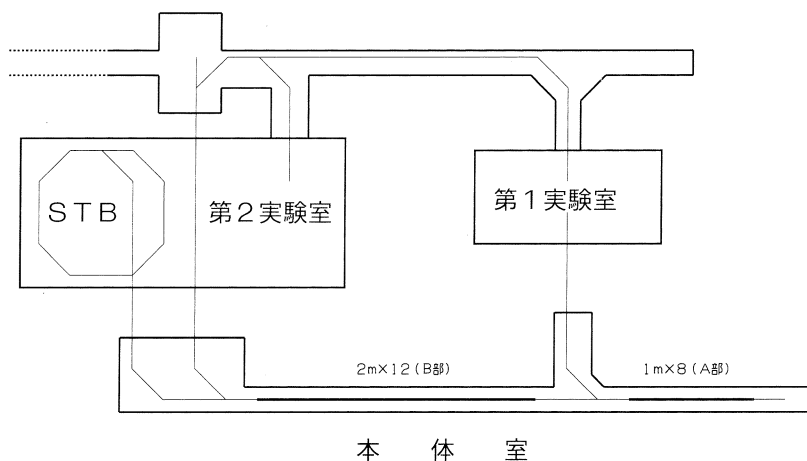
やすいところにドアノブ保護のビームのコリメータをいれることにした。もともとスペースなど考えていなかったところに入れるため制約があったが、A 5, B 1, B 2, B 9の加速管の前に設置した。その結果可動部の温度上昇もなくなり、マッチングの問題は一応解決した。

## 2.3 現在の問題点

### 2.3.1 加速管の真空

加速管の耐電力は真空度だけでなくその質も大切である。76年9月のRF窓から真空系への浸水事故は、別項で述べるが、再開後の加速管の性能はVSWRは再調整で規格値1.05以下になったが、耐電力は平均20%程度落ちた。しかし徐々に回復していた。

ところが最もおそれていたことを起こしてしまった。91年2月、ショートバンチの装置を本体に組み込もうと、乾燥窒素を入れて一気圧にした。その際、ボンベからの窒素の冷却が十分でなかったため、油分まで窒素と一緒に入ってしまった。詳細は真空系の項で述べるが、現在も加速管にマイクロ波を入れた際のガス放出は多く、まだ後遺症は残っている。この現象がいつ収まるのか見当が付かない。



第1図 加速器設備概略図。

### 2.3.2 ドアノブの温度

RF電力をいれるとドアノブの温度が上昇し安定するまで5分ぐらいかかる。これはこの部分が温調されていないからである。このことは実験再開時に、この間はビームの出が悪いという現象になる。特にエネルギー圧縮装置（以下ECSと略する）を通しているときはこの5分間でリークすることがあり問題であった。一部温調をしたが、まだ全数実施していないので、



フランスまで送り返すのは運賃の負担だけでなく、日時も費やすことになる。

リニアックには5本のTV-2014を用い、運転初期には予備も含んで10本購入した。その後は三菱電機製を購入している。初期のこの段階では、カソードの寿命は約2,000時間と推定されていた。その前にカソードを交換すればさらに2,000時間使えるということで修理が行われた。修理費は新品価格の約1/2、それに製品内部の損傷具合いや、劣化の状態も解りその後の改良に役立ち一石二鳥と、修理は積極的に行なわれた。一方、初期故障による返品も8本あり、製作、修理と併せて三菱電機のクライストロン製造部門の奮闘ぶりがしのばれる。この10年間は“混乱期”で、球の入れ替え作業は頻繁に行われた。超多忙であったが修理品や故障したものからは貴重な情報が得られた。1) カソードは2,000時間程度でまだ劣化していない。2) アノードの材料の変更、3) 出荷時の検査とエージングに十分時間をかける、などである。そこでカソードがまだ使えるのであれば、果たしてどの程度まで寿命があるのか。このような疑問がわきだしても不思議でなかった。7~8千時間はある、との見通しで1本をエミ減になるまで使ってみることにした。

73年7月から約1万時間(78年4月まで)運転が出来た。これは我々の予想を超えた結果で、このテストをしながら、他のクライストロンも順次この方式に切り換えた。‘使い切り修理はしない’、がこのときからの方針となった。76~87年は一応“品質安定期”といえよう。しかし、次の障壁が待ち伏せていた。1万時間を超えた頃からアノードの付近の温度が上昇し、ついには100度を超え、冷却水漏れが生じた。この原因はカソード物質が蒸発しウエネルト電極に付着し、やがてそこから電子を放出しアノードの穴を通らないものが、付近に当たり温度を上げるためであった。

そこで89年には、カソードの材料を含浸型に換え、カソードの温度を下げることにした。同時に出力も安定に25MW以上出るPV-2014B1が完成した。98年現在3本納入され使用中である。やっと、“円熟期”を迎えたように思う。

5本のクライストロンの年間延べ使用時間は約1万時間であったので、今まで2年に1本購入していた。今後、運転時間の大幅な増加があれば、このペースも変更になるだろう。購入で受け入れたクライストロンは1号機にマウントしている。これは“混乱期”の名残でなるべく早く保証時間1,000時間を超させるためで、これからもこの方針でよいだろう。

STB建設前10年間の故障したクライストロン5本の平均寿命は11,600時間であった。現在使用中のもの5本の平均使用時間は前出の寿命を越え、12,100時間(1万円/時間)である。第2表にクライストロンの年度別の受け入れ本数などを示す。

第2表 クライストロンの購入状況。

年度	受入	延受入	スペア	故障	修理	返品	延不良
1966	5	5					
67	3	8	2		1		1
68	4	12	2	2	1	1	5
69	6	18	4	1	2	1	9
70	9	27	8		3	2	14
71	5	32	8	2	1	2	19
72	6	38	11		2	1	22
73	4	42	15				
74	3	45	17	1			23
75	2	47	17	1		1	25
76	1	48	17	1			26
77	1	49	17	1			27
78			16	1			28
79			16				
80			15	1			29
81			15				
82	1	50	15	1			30
83			14	1			31
84	1	51	15				
85			15				
86			14	1			32
87	1	52	14	1			33
88			13	1			34
89	1	53	14				
90			12	2			36
91	1	54	13				
92			12	1			37
93	1	55	13				
94							
95							
96							
97							
98							

### 3.3 問題点

#### 3.3.1 価格

消費税込みで現在1,260万円である。ほかのクライストロンとの比較は単純でなく、難しいが、STB入射器としてのリニアックであればこれより安い物（デューティが低い）が市販されている。しかしクライストロンの機種変更はそのための変更箇所が多く、改造費用が相当高額になる。

### 3.3.2 エネルギーとデューティ

現在のリニアックはエネルギーは230MeV, デューティは1,000分の0.6である。エネルギー増強について利用者の要望がある。加速管をそのままにし PV-2014B 1 をフルパワーで運転すると, エネルギーは260MeV 程度になる。しかし, パルサーの耐電圧, 導波管, 加速管の耐電力の問題があり, かなり厳しい。デューティは STB の時は1,000分の0.3, I 系照射の時は1,000分の0.9である。

## § 4. 電子銃<sup>11, 12)</sup>

現在使っている電子銃は寿命も長くエミッション電流も大きくとれ十分満足している。前出の油汚染の問題は電極の掃除とカソード, グリッド, ヒータの数度にわたる交換とで現在は落ち着いてきた。しかし朝, 加速管に最初に RF を入れるとガスを出し, 一時的にエミッションが減る。電子銃を安定に動作させるため, 真空も質の良い高真空が必要である。加速管との間にあるゲート弁が閉じ切らなくなったので, 更新することになるが, 良い真空ということで差動排気に改造したい。

STB の入射を主目的とするときには, 1  $\mu$ S. のグリッドパルサーに問題が多少ある。

## § 5. パルサ (パルス変調器)

### 5.1 クライストロンパルサ<sup>13)</sup>

#### 5.1.1 高圧コネクタ

第2図のパルサの概念図でも示されるようにメインになるラインは最高直流25kV, 共振で充電された50kV ライン, PFN の放電によるパルス25kV ラインとパルストランスの2次側の250kV ラインである。このうち最後の250kV ラインは油中でクライストロンのヒーター用ソケットでクライストロンに接続され, コネクタは使っていない。設計当初のケーブル, コネクタでそのまま使用されているのは, 直流25kV ラインだけである。50kV ラインではおもにケーブルの末端処理をした箇所での放電が頻発した。そこでこのケーブルとコネクタを新たに作り交換をした。また25kV パルスライン (本体とパルストランスタンクの間) はケーブルの第二導体と第三導体の間に約7kV の電位差が生じ放電したので, コネクタはそのまま, ケーブルを同軸管 (金属製) に換えた。この回路はその後大きなトラブルは発生していない。50kV ラインは2~3年でケーブル末端が放電し, しばしばコネクタも破損した。87年にチャージング・ダイオード・タンクをファンで空冷<sup>14)</sup>したところ, 目的だったダイオードの破損防止だ

第3表 東北大学300MeV リニアックの主な改良・保守事項。

63	テストベンチ (TB) 建設決定
64	TB 試作運転 (加速管, モード変換器に問題あり)
65	TB 真空良くならず, 1 m 加速(4.5MeV, 350mA), 加速管再び耐電力低下 (交換), 本体建屋起工式
66	TB クライストロン窓破損, 加圧ガスをフロンから SF <sub>6</sub> , 油による汚染を除去, 放出ガス量を $2 \times 10^{-11}$ Torr $\cdot$ l/s/cm <sup>2</sup> , 本体搬入組立開始
67	加速に成功, 開所式, テスト実験開始
68	励振系改造 (空洞発振, 板極管増幅), 短パルス加速可能, BBU 対策 Qmag, KP 改造失敗, クライストロン窓破損
69	TOF 完成, BBU 対策加速管 2 本 (A 部)
70	励振系改造 (SAS61), スリット駆動部更新
71	夜間運転開始, ND トーチカ完成, I 系に TMP
72	$\gamma$ 線チャンネル新設
73	一週間連続運転開始
74	ND 被曝事故, マシン制御用計算機導入
75	II 系に TMP, I 系ビームダクト更新, B12 加速管放電交換
76	励振系改造 (固体発振器), ECS 完成 (制御に MELCOM70, CAMAC 使用) 水漏れ事故, B 9-12 の RF 窓を本体室に
77	
78	KP 3 更新, 宮城沖地震, 個人キー新設
79	マシンのタイム増(312)
80	
81	SSTR 完成
82	
83	エミッションの安定化
84	deQing 更新
85	ビームロスモニタ, ビームスクリーン新設
86	II 系差動排気新設, II 系分析ダクト水漏れ, ECS 電源更新
87	AD-6 アルミ化, KP 空冷強化, クライストロン集束コイル水漏れ
88	F-175採用
89	冷凍機更新, 三方弁新設
90	
91	ビームチョッパー取り付け試験
92	G 2, 3 更新
93	空調機更新
94	
95	ND トーチカ解体, STR 建設開始
96	II, III 系再構築
97	STB 完成
98	STB 検査合格, ブースターモード1.2GeV

けでなくコネクタの寿命も延びた。そこで更に室温をこれまでの25°Cから20°Cに下げたところ他のコネクタの故障もなくなり現在までの7年間で1件だけに激滅した。コネクタの破損の原因は熱によるものと思われる。なお20°Cに下げた結果、パルスの繰り返しを50ppsにしたとき、サイラトロンが通弧しなくなるものがあったが、リザーバ電圧を調整すれば正常に動作をした。同軸管は2万時間で点検清掃をする程度で故障はない。

#### 5.1.2 シャント、チャージング・ダイオード

最初日本インターの5 M10を油中で用いていたが、モールド型だったので、これを NEC の RS21S 8 に変えた。選定理由はハーメチック型で、漏れ電流が少ないことであった。更新後もしばしば故障したが、その都度作り置きの子備のストックと交換した。ところが前述の室温を20°Cに下げた結果、その後の故障は1件のみであった。

なお78年に更新した#3のダイオードの油入タンクはストックの保護のためのアブソーバの抵抗も同じタンクの上部に収容されている。この抵抗の発熱が大きく、コネクタの故障等を誘発した。油は水冷されていたがうまく対流しないので小型の攪拌器を入れ強制循環させ解決した。水冷タンク内のものの配置は対流を考え冷却効果が上がるようにする事が重要である。

#### 5.1.3 チャージング・チョーク

最初のものはすべて交換した。0.7H、二次巻き線付の仕様であったが、漏れインダクタンスが大きいのと、機械的に弱く、振動で変形し、巻き線が焼けるなどの不具合があった。78年に#3を更新する際、漏れインダクタンスを小さくし deQing の性能を向上させ、又巻き線間の電圧分布を考慮して壊れないチャージングチョークの設計をした。これが成功し、他の4台も交換し84年には deQing が性能を向上させて復活した。更新後故障は皆無である。

#### 5.1.4 IVR (Induction Voltage Regulator 誘導電圧調整器)<sup>14)</sup>

高圧用変圧器の入力側に IVR が接続されている。これは電圧の設定と共に、入力電圧変動を軽減するためである。これの駆動はウォームギアを介して電動機に接続されている。87年にはこの故障が頻発した。“DC OVLD (直流過電流)” に依りシャットダウンし、同時に駆動部まで壊れるのである。ひどいときには IVR の回転軸が、リミット・スイッチで止まらず、それを乗り越え、激しく過回転止めにぶつかった形跡まで残っていた。何が起きているのか皆目見当が付かない。現象をとらえるため、ビデオに収めることにした。そこには電圧が下降する方に IVR の回転軸が回っている様子がテープに収められていた。しかも1枚の画像で現象は終わっていた。なぜか、教科書を調べたところ、IVR は誘導電動機とほとんど同じ構造であった。二次側の短絡で回転力が生じて不思議でない。しかもウォームギアは逆転しない

と思っていたのが間違いで、十分逆転するのであった。その思い込みが原因究明に時間を費やした理由である。

一連の現象を推察すると、1) 駆動ギアボックスの取り付けボルトがゆるんでいたときにサイラトロンの連続通弧が起り IVR の回転軸に回転力が発生しボルト止めの部分がかけた。2) IVR の 2 次側 (回転する側の巻き線) 巻き線の被覆が磨耗のため損傷し、短絡した。そのため回転力が生じギアを破損した。5 台の IVR を修理し、その後この現象は起こっていない。

現在はパルスモータで設定電圧の 1% 制御<sup>18)</sup>を行っているので、以前のオンオフ制御用の電磁接触器の故障もない。

更に、88年にサイラトロンを KU-275C から F-175 (規格はほぼ同じだが改良品) に換えた。これにより連続通弧と思えるシャットダウンが 1/5 程度減り、寿命も延びた。

#### 5.1.5 PFN のコンデンサ

インピーダンス 6.9Ω, パルス幅約 4 μs, 50kV 耐圧の PFN が設計された。コンデンサは 0.01 μF を並列 17 段使用予定であった。

初期故障が起こった。コンデンサが次々とパンクするのである。壊れたものを製造元に送り返し原因を調べてもらった。なかなか返事がこなかったのでこちらでも分解したところ、金属バンドのバリが絶縁シートに食い込んでいた。パルス運転の振動で少しずつ食い込んでいったものと想像できる。この点を改良しバンドの下に補強用の紙を入れたものが作られた。このタイプは今も使われていて、ほとんど故障していない。

最初の製品は碍子の付け根部分で放電した。これはその部分を高分子樹脂で覆い固めて解決した。

#### 5.1.6 PFN の短絡環

パルスの平坦部の調整はインダクタンスを変えることで可能である。そのためコイルの中に短絡管を入れ、それを出し入れして調整した。最初のはコイルの内側に 6 本の石英ガラス棒を立て、それで短絡管を保持した。その石英棒を固定するため固定板との間に接着剤を用いた。この接着剤の焼損で数ヶ月使ってだめになった。2 番目はデルリンを用いたが短絡環との接着部のやはり焼損でだめ。3 番目はデルリンにねじをたてビス止めをしたがデルリンの熱変形でだめ。4 番目はセラミックを使おうとしたが高価でだめ。しかしパルスの平坦度は重要であり、短絡管をつける方向で検討している。



### 5.1.7 高圧整流器

やはり耐油性でなかったため並列のコンデンサと共にハーメチックシール型に交換した。絶縁油は88年に5台とも交換したが、今後はチェックマン（絶縁油の酸化度を調べる試薬）<sup>14)</sup>で調べ、変質が発見されたら交換する。

### 5.1.8 インターロックなどのリレー回路

最初のものは接点がむき出しのものであったが、むしろ波形歪などで接点の振動（チャタリング）などによる故障が多かった。波形や電流値を適正にしたので殆ど故障はしないが、信頼性を高めようとするならPLCの採用なども考えられる。

### 5.1.9 クライストロンのヒーター回路

89年納入のクライストロンからPV-2014B1となった（改良型は現在3本）。25MW以上の出力を有し、価格は据え置きである。改良したところはカソード・ヒータの部分で熱容量が大きくなったため、使用するのに次の改造を必要とした。5台とも改造は完了している。

起動時、スロースタータの回路。一次側の電流値で投入後10分までは4.5A以下とし、その後20分間指定値で余熱する。

停止時、1) イオンポンプはオフ後30分動作を続ける。2) 冷却系（VAPO）もオフ後30分運転する。

## 5.2 電子銃パルサ

### 5.2.1 パルストランスタンク

電子銃の陰極電圧は約100kVである。パルストランスは1:10の昇圧比で、付属する回路とともに電子銃のすぐ脇のタンクに収容されている。

91年9月、このタンクの中で大量の錆が発生した。同時に絶縁低下とともに端子などが腐食した。原因は湿度が高いときにタンクを冷却したための結露であった。

処置は錆を落とし、タンクの内面は錆止め塗料を塗り、腐食した箇所は交換した。幸いパルストランスは無傷であったので修理に要した時間は短かったが、再度起こさないために次の対策をしたい。

- 1). タンク内は外気と遮断する。もしできなければ通気口をもうけそこに乾燥剤をおく。
- 2). 室内の湿度を高めないようにする。長期間、空調をしないときは小型の除湿器をそばで運転する。
- 3). 絶縁油の管理を定期的にする。

この作業時に、疑似負荷の抵抗の劣化も発見された。電子銃はインピーダンスが高いのでパ

ルストランスの一次と二次のマッチングをとるため二次側に疑似負荷（5 K $\Omega$ ）をつけている。抵抗の塗膜がはがれていたものの抵抗値を測定したら、定格より高くなったものが見つかった。抵抗の発熱か、高温の絶縁油による劣化が原因と考えられるので、絶縁油を強制循環させたい。

### 5.2.2 ダイオードの劣化

チャージングとシャント用のダイオードは1 kV, 3 A のものを十分な耐圧になるように直列接続をして絶縁油中で使っていた（特に冷却はしていない）。これが頻繁に故障をし、その修理に追われた。同じ時期にクライストロンパルサのチャージングとシャントダイオードがやはり故障を繰り返していた。クライストロンパルサでは新たに逆方向の漏れ電流の少ないものに変更した。それまで使っていたものが不要になったので間に合わせに、これをガンパルサに使った。規格が十二分に余裕があるので空气中に置いたが、その後20年間そのままである。

### 5.2.3 サイラトロン

現在使用中のものはガラス製の4 G48P（国産）である。最近購入しようとしたら受注生産とのこと、代換え品の検討が必要かもしれない。

### 5.2.4 グリッドパルサ

半導体にしてからノイズの影響を受けやすくなった。ここでの変動は絶対あってはならない。早急に対策を立てなければならない。まず電磁シールドをきちんとやって、ノイズに強くして、次に波形の平坦度をよくする。

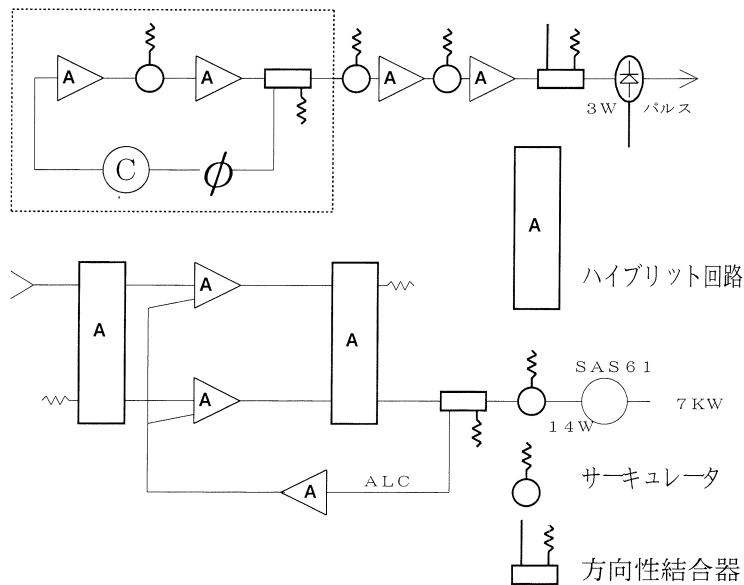
## § 6 高周波回路

### 6.1 励振系

#### 6.1.1 発振部

最初は水晶発振子から54通倍して2,856MHzを得ていたが通倍部に不安定さがあり、空洞を用いたものに変えた。これは発振回路に板極管（3 CPX100A 5）を用い、空洞は周波数変化を極力抑えるために温調をした。この方式は板極管の陽極と陽極空洞の間を絶縁しているマイカ板の絶縁不良がしばしば起こり、運転を中止した。この修理は意外と時間がかかり、系全体の見直しを迫られた。

ECSの建設と同時に第3図に示す方式で改修が行われた<sup>16)</sup>。温調をした空洞はそのままに、発振回路は板極管に変わり半導体を用い、連続波の発振を可能にした。連続波は位相測定などに使えリニアックの性能を知る上にも非常に有用である。連続波は数ワットまで増幅した後、パルスにし、更に増幅して14ワットの出力を得ている。この部分は現在一応問題はない。



第3図 現在の励振系。

### 6.1.2 増幅部

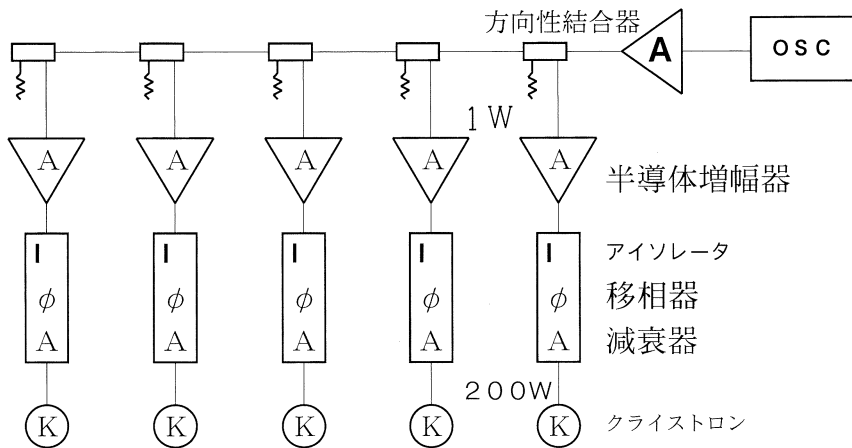
終段増幅管はクライストロン SAS61を使う予定が入手に手間どり急遽板極管の2段増幅に切り替えた。金メッキをした銅製の空洞にマウントされた板極管 (TH6886) は入力，出力両空洞の調整に慎重さが要求された。しかも出力の低下が早く (エミッションの低下，放電，空洞のチューニングのずれなど) 運転中止が頻発した。SAS61が入荷したので予定どおりこれを使用していた。しかしこれが製造中止になり現在手持ちの中古2本だけで，そろそろ代替品を考える必要がある。

### 6.1.3 パルス電源

板極管にはハードチューブパルサでパルス電圧を供給していた。終段のハードチューブとして3F60Pも製造中止になり，さらに前段の2B29P (829B) も入手困難でやむを得ずラインタイプパルサにした。現在15,000時間故障なしであるが，パルスの平坦度など不満があり，将来の検討事項の一つである。

### 6.1.4 新しい励振系

改良型のクライストロン (TV-2014B1) は入力電力は200W程度である。励振系とクライストロンを1対1にすると250W出力半導体回路で間に合う。このアンプと減衰器，位相器などを第4図のように構成することを検討中である。



第4図 計画中の励振系。

## 6.2 立体回路<sup>17, 18)</sup>

### 6.2.1 大電力移相器

現在使用中のものはほぼ完成品である。初期のものからの改良した箇所を列挙する。

- (1) プランジャ軸からの電力の漏れ。チョーク構造のプランジャを2連から3連に増やした。
- (2) プランジャと導波管内面間の放電。プランジャ移動時に内面とのギャップを一定にするためプランジャ軸を2カ所で支持した。
- (3) 加圧ガス漏れ。鋲付けを電子ビーム溶接 (EBW) にした。

### 6.2.2 その他の導波管

建設初期のものの不具合箇所

- (1) 加圧ガスによる膨らみ。導波管肉厚を2 mm から4 mm にした。
- (2) フランジが反りガス漏れを起こす。フランジ厚を8 mm から10mm にした。

なお、電力会社ではSF<sub>6</sub>ガスの回収を検討中との新聞報道があった。

## 6.3 測定回路

同軸スイッチ (三菱電機製) の具合が悪くなった。ビームローディングを調整するため重要である。他にも位相関係、電力の測定に使用している。98年7月同軸リレースwitchにビームローディングの回路のみ更新した。

## 6.4 RF 窓破損による真空系への浸水事故<sup>18, 19)</sup>

76年9月24日16時頃、工事後の試運転中にこの事故は起こった。加速管、導波管、ビームダ

クトおよびイオンポンプなど、真空系のおよそ2/3、約230mが水浸しになった。詳細は文献を参照されたい。共同利用再開まで1ヶ月でこぎつけられたのは施設全員の協力の賜物である。

## § 7. ビーム輸送系

### 7.1 ビーム取り出し窓

はじめは成形したアルミニウムでシールの所は一体構造になったものを使った。取り出し電流の多いところは二重構造として、間に冷却用の水を流した。しかしこの方式のものはほとんど実用にならず、チタンのフォイルを使うことにした。50 $\mu$ のフォイルに銅のリングをアラルダイトで接着しアールのついたエッジで止めた。この方式は窓の径も大きくとれ、しかも比較的簡単に取り付けができる。ただビームにより真空シールの部分が温度上昇を少し繰り返すと真空リークが起こった。これはこのところにビームが当たらないように上流にビームのコリメータをいれて解決した。また照射用のチャンネルは平均150 $\mu$ Aのビーム電流でフォイルが変形するので空冷にしたが、約1年(50シフト)ごとに交換している。

低エネルギーの原子核実験で問題になったのがBDM上流の窓の厚さであった。チタンのフォイルをフランジ(SUS)に直接金鑽付けして、両サイド真空で使用した。厚さは20 $\mu$ だった。1気圧から真空に引くときは両側を同時に引かなければならなかった。この方式は鑽がフランジ材質になじむことが大事だ。

なお、IV系は特に窓をつけずアルミのめくらぶたをつけている。10 $\mu$ A位のビームは通せる。

### 7.2 エネルギー圧縮装置(ECS)<sup>21-24)</sup>

エネルギー圧縮装置が完成してエネルギーの分解能0.1%のビーム強度が1桁増加した。これによって、原子核実験に大きなはずみがついた。一方運転維持では大きな負担となった。まず相次ぐ真空リークと、運転の難しさである。

#### 7.2.1 真空リーク

デバンチ用のマグネットの磁極間隔が40mmで真空ダクトの縦方向の内法が35mmである。設計では十分ビームが通過できるはずであったが、いたる所で真空リークが起こった。まずM1用ダクトの縦方向にビームが当たり、リークする。加速管のディスクの穴径は約20mm、途中の速動弁の内径が35mm、横方向のスリットSD IIがある。フランジの冷却をし、ビームスクリーンモニタをいれた。ビームの芯は通ってはいるが広がったビームがフランジに当る。そのためのリークだった。ここはビームスクリーンをみながら上流のQ電磁石でビームスポット

を調整し当てないようにすることで解決した。

### 7.2.2 調整

要求されたエネルギーをまず ECS を通さないで II 系に出し 0.1% で約  $1 \mu\text{A}$  にする。次にエミッションを止め、ECS 系の電磁石を励磁し再びビームを出す。問題はこのときである。ビームの上下が狂うのである。これを補正してビーム電流が前と同じになったところで、あらかじめ A 4 から分割していた RF 電力を減衰器を抜いて ECS 加速管に入れる。ECS 加速管の位相を調整しビーム電流を増やす。M 2 の SOR をモニターするのに発光点に目印のワイヤーを入れたが内部が暗く ITV がセットしにくかったので、そこに豆ランプを入れ必要な時照明している。

再度加速のため RF を入れたら 5 分位待ってから電子銃のグリッドをオンにすることは運転時の重要事項である。これは前に書いたように加速管のモード変換器の温度変化のためである。

### 7.3 電磁石電源

入射系のソレノイド電源 (G 1, G 2, G 3) を最後に全て更新した。

## § 8. 真空系<sup>25-27)</sup>

第 5 図に真空系の概念図を示す。

### 8.1 真空ポンプ

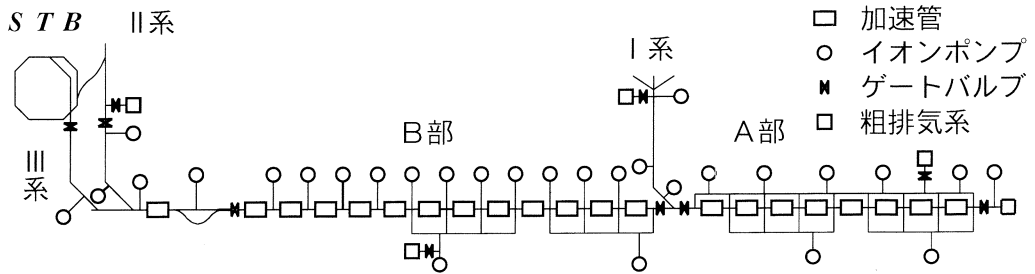
完全オイルフリー、全金属製、定常時はイオンポンプのみの動作など当時の技術の先端をいく設計だった。しかし粗排気に使用したメカニカルブースタ・ポンプの到達真空度があがらず、予定を変更して油拡散ポンプにした。勿論液体窒素トラップを用いたが、細長い真空系を引くには長時間かかり油の逆流は完全には防げなかった。

粗排気系の配置は第 1, 第 2 実験室で、例えば電子銃のカソードの交換後の粗排気は約 25m 先の第 1 実験室から行き、イオンポンプが動作を始めるまでの時間（この場合で約 3 時間）粗排気が続けられた。71年にターボ分子ポンプを採用した。これはこのリニアックにとっては救世主だった。しかし初期のこのポンプは油の逆流が少しあるとすることで（未確認）、粗排気の時間を出来るだけ短くするため加速管列にも粗排気系を 2 カ所増設し、4 カ所にした。

### 8.2 真空の事故

#### 8.2.1 油汚染?

加速管の項目で少しふれたが、ここで改めて述べる。91年 2 月 1 気圧にする際、窒素を入れることにした。それまでは空気を入れていたが窒素を強くすすめられたのでそうすることにし



第5図 真空系の構成図。

た。今思えば考え方は良かったが、方法がまずかった。マシングループで窒素を入れた経験のあるのは筆者だけでそれもテストベンチで液体窒素を気化して入れた。市販のポンベから入れた経験はない。冷却装置を通すことにしたが、冷却が十分でなかったと思われる。窒素を入れたときは、油が入ったとは思っても見なかった。その後運転再開してことの重大さに気づき、震えが止まらなかった。電子銃内で放電が起こり、ガラス管の内面が黒く汚れてきた。油が入ったのだ。こんな簡易方式はきちんとテストをして絶対大丈夫との確信がなければ、本体に応用してはならなかったのである。現在も立ち上げ時にマイクロ波を加速管に入れるとガスが放出される。

### 8.2.2 ビームによる溶解

ビーム電流が当時としては経験したことのない電流で種々思いもかけないトラブルに遭遇した。まずビームの直接当たった箇所の溶解事故である。A部とB部の間にある速動弁のフランジに穴をあけてしまった。原因は直前のI系の偏向電磁石(M1)の残留磁場でビームが曲げられたためである。真空リークが起こった時、すぐ本体室にいったら、“シュー”と音がしていた。速動弁の穴径が35mmで、直前の分析管(AD1)は横方向が90mmでビームが当たっても不思議でない組み合わせであった。

### 8.2.3 加速管のモード変換器(ドアノブ)の溶解 (加速管の部を参照)

### 8.2.4 ビームによる偏向系のリーク

三カ所の偏向系は偏向ダクト(AD1, 6, 8)直後の45°曲がったところに大口径のゲート弁を入れる予定であったが、当時入手できずつなぎ管にした。そのつなぎ管のフランジが頻繁にリークを起こした。そこでこのフランジを現場で溶接した。その後しばらくリークは起こらなかったが、やがてこの付近のダクトの側面が変色しひび割れがはいりリークし始めた。すぐダクトを作れないので、ステンレス板をあてて溶接した。

### 8.2.5 ダイモテープがリークの原因になる

建設の数年後、小さなリークが発生し漏れ探しに苦労した。それはフランジでなくダクトそのものの側面からリークしていた。建設当初に製作されたビームダクトには品番を示す（組立時に必要であった）ダイモテープが貼られていた。このテープの貼ってあるところから漏れていた。よく見ると、ダイモテープが貼ってあったところがプツプツと荒れている。その一部が貫通したものと思われる。テープに付いている糊が原因である。同じようなことがビニールテープでも起こった。リークを探すときリーク箇所を特定する際ビニールテープでふさぎながら探すのはよく行われている方法である。これを行った後、テープを貼ったままにしたり、テープの糊が残っていたところにビームが当たるとステンレスといえども腐食してリークする事があった。その後マシングループでは真空系は勿論放射線の発生するところではこのような材料は極力使わないようにしている。しかしそろそろ忘れられようとしている。

### 8.2.6 速動弁

建設に際し、ビーム取り出し窓も心配の種であった。もしやぶれても加速管、電子銃などを守るため、速動弁を開発することになった。200ミリ秒の動作時間のものが出来これを採用した。シール部はステンレスのナイフエッチに銅が食い込む方式である。最近完全に閉じ切らなくなった。窓も丈夫になり破れることがここ15年間なかったので、高価な速動弁をやめ、この際市販の全金属製のゲートバルブ（動作時間2秒）に換えることにし、98年の7月末に交換工事を行った。

## § 9. 冷却系<sup>28-31)</sup>

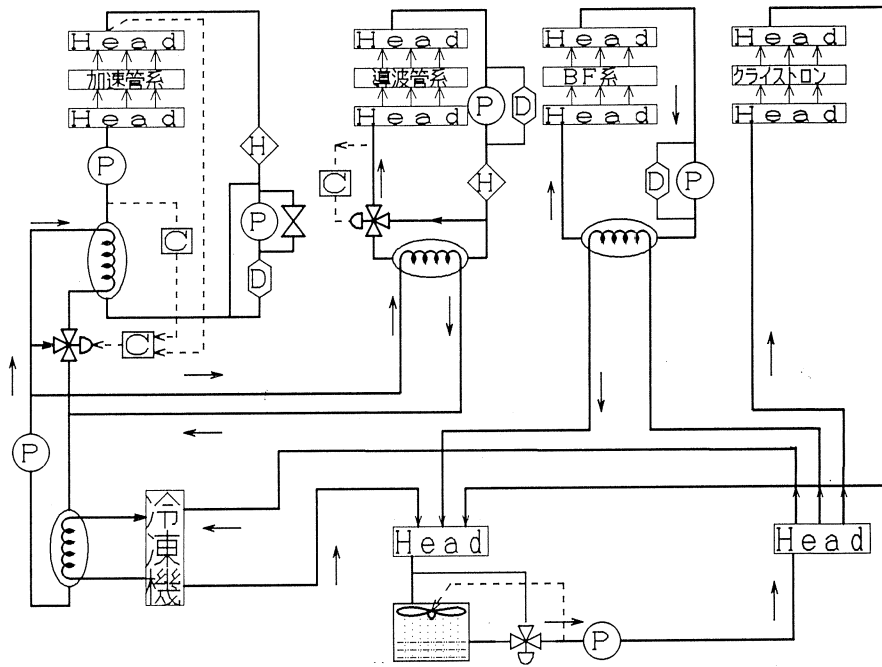
### 9.1 構成

基本的には建設時とほとんど変わっていない（第6図）。図にはかかれてないが電磁石室に冷水（冷凍機で冷やされた水）を送り電磁石電源の冷却系を追加している。

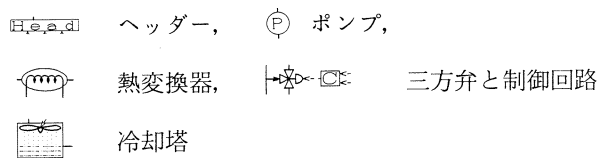
### 9.2 冷凍機

最初の冷凍機はレシプロ型で22年使かったが、末期には故障が多くもう少し早い時期に更新をすればよかったと思う。故障の原因の一つに冷却水温度の不適がある。冷却水はクーリングタワーで冷やされるが冬期には冷えすぎになる。これで気化しない冷媒が液体のまま冷凍機に戻り、液圧縮を起こす。89年、スクリュウ型冷凍機に更新し、その際冷却水回路に三方弁をいれ温度制御をすることにした<sup>32)</sup>。更新後、故障はない。





第6図 冷却系構成図。



### 9.3 熱交換器

加速管系，導波管系およびビームダクト集束コイル系の熱交換器は一度も故障していない。クライストロン冷却系のもは一次側水路に泥がたまり交換効率が落ちることがしばしば起こった。これを除くのに以前は熱交換器を全体を解体したが，現在は簡略化した。しかし泥のたまらないものに換えた方がよいと思われる。

### 9.4 パイプの継ぎ手

数えたことがないのでこのマシンにパイプの継ぎ手が何個使われているかわからない。しかし種類ぐらひは数えられるのではないかと、思い数えることにした。しかし無理，同じようなフランジでもパッキンの材料がいろいろあるし溝のあるもの，ないものボルトの太さ，数，いったい規格は存在してるのだろうか。さらにパイプの太さのミリ，インチ等々。もうお手上げだ。意識して統一規格を作らないとふえる一方である。

## 9.5 冷却塔

更新を考え予算要求をしてから何年になるだろうか。土台は腐り水漏れはする、手入れしようとするとかえて壊れてしまいそうである。もし故障（水漏れ？）したら、復旧まで数ヶ月以上かかるだろう。

## § 10. 設 備

### 10.1 電気

#### 10.1.1 地絡事故 1 (94. 1. 17)

94年1月主制御室でビーム電流波形測定用コアモニタのオシロスコープ上の波形に50Hzの交流が乗った。また測定室ではオシロスコープが原因不明で故障した。一方測定器用の電源ラインがアースに対して両方とも浮いているらしいとの話もあり、電気室に連絡をした。

ラインが浮いていると機器の破損はもとより、感電事故や火災の可能性もあり、すぐ対処しないといけない。

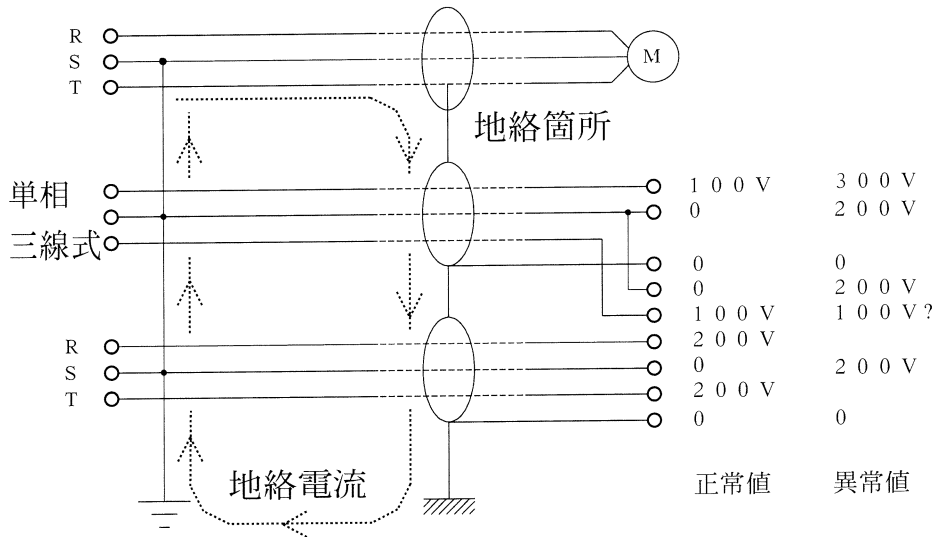
アースから浮いているラインを電気室で測ると正常であった。また地下排水ポンプの三相ラインの電流計の指示がおかしい。相電流をクランプメータで測ると一相だけが流れていた。アースラインを測ると同じ値を示した。送電をやめると、制御室ではコアモニタの波形がきれいになり、測定室のラインも正常になっていることがわかった。排水ポンプを動作させると第7図のようになり上記の現象が生ずると推察された。

地絡箇所は本体室のI系偏向系付近の配線用パイプ内で起こっていた。原因は電線の被覆の放射線損傷である。

#### 10.1.2 地絡事故 2 (98. 8. 3)

KP3の低圧を入れるとほかの商用電源のアースからの電位がおかしくなる(98年8月3日)。3号機のVAPO(クライストロン冷却装置-トムソン・バリアン社)のポンプを交換し、試運転時に起こった。

ポンプを動かすために、バルサーの低圧を入れたら、作業灯が明るくなった。すぐ電圧をはかったところ、通常100Vのところ180Vもある。よく見ると作業灯は単三式のホット側とアースに間違えて接続されていた。どこかで地絡しているために起こったのではないかと思い、ほかの方法で試運転を行った。



第7図 地絡電流による異常電圧。

翌日、電源室などのトランスの接地電流を測定した。パルサーの低圧を入れるとGL-3 (単三-100V ライン) のトランスのアース電流が約17A 流れる。GL-3 にはパルサーが直接接続されていないが、制御室 (M-3) やクライストロン室の例の分電盤にもつながっている。まずM-3 を調べた。アンバランスの回路が見つかった。それはパルサーの低圧を入れると点灯する赤色灯の回路で約16A のアンバランスが生じていた。

STB のRF のサーキュレータ用ブローアの動作がおかしかったのもこれが原因であった。地絡していた箇所はやはり本体室であった。

地絡の事故は人為ミスでも起こる。この10年間で上記2件のほか3件の人為ミスがあった。

このような地絡事故は機器を破損するだけでなく、火災に又一つ間違えば人身事故にもつながりかねないので、早急に各トランス、または経路に漏電検出器を設置することが望ましい。

### 12.2 空調

93年にフロンを使っていた冷凍機 (3台) の代わりに重油を焚く冷温水発生器に更新された。これと同時にボイラも撤収された。設備容量は以前より多少増えたが除湿用配管がなくなったため、現在除湿が出来ない。本体室は小型の除湿器を空調停止期間中運転を行っている。

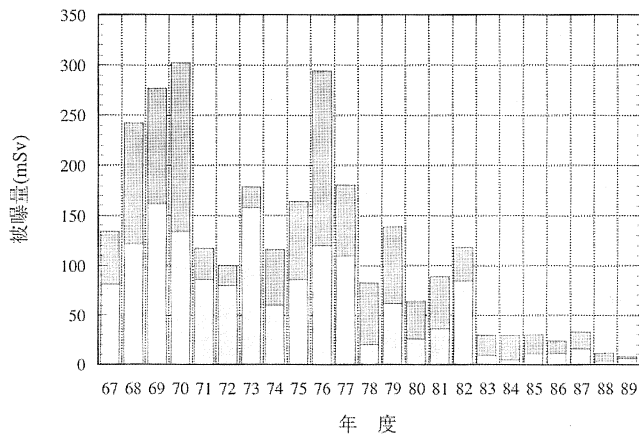
クライストロンパルサーは室温を20度に下げたら故障が極端に減った。しかし空調で機器を冷やすのは筋違いでパルサー自体で対策を立てる必要がある。クライストロン室内の熱負荷としての導波管に保温材を巻くのは有効と思われる。

## § 11. 作業時被曝の軽減

作業時被曝を1/30に軽減することができた。

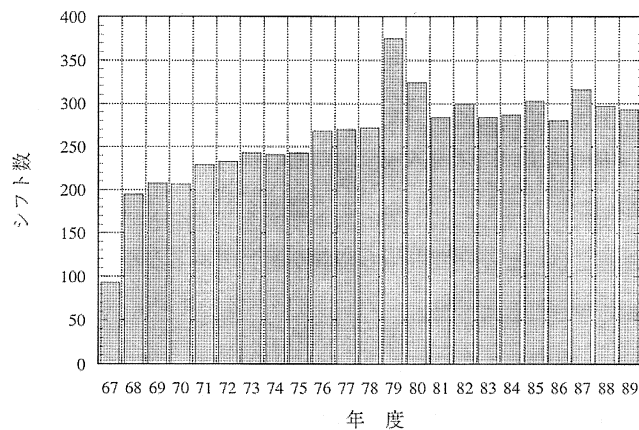
### 11.1 経過

マシンの完成を待ちかねていた研究者は少ない割り当て時間で、より成果を上げるため懸命の努力をした。しかし初期故障などで実験の中断が頻繁に起こった。我々は実験時間の確保のため、すぐ修理を行った。従って作業被曝も増えた。年度別被曝量を第8図に示す。この図から作業被曝に関して五つの期に分けた。マシンタイム（第9図）が増すにつれて被曝量も増えた67年度から70年度の期間を第1期とする。やがて共同利用が軌道に乗りだしたので、多すぎ



第8図 作業者の年間集積線量の推移。

■ 実験グループ  
□ マシングループ



第9図 マシンタイム実施状況。

る被曝量の軽減を模索することになった。まず被曝を伴う故障を減らすことが重要である。しかし種々対策がとられたが初期故障はまだ続いた。そこでとりあえず放射線の冷却時間をとり、故障修理をすることにした。ある程度の減少はあったが、大幅の改善は見られなかった。この期を第2期(71-75)とする。故障は真空リークにとどまらず、スリットの動作不良、冷却管の接続部などの水漏れ等、後半には再び増加し始めた。第3期はエネルギー圧縮装置の完成した76年度からである。6月に完成し運転を始めたが真空リークが頻発した。それに9月には導波管気密窓から冷却水が真空側に漏れ、この回復作業でまた被曝量は増えた。この作業を手伝った、研究者や他の職員も被曝した。この水漏れはB部加速管、導波管、II、III、およびIV系ビームダクトにわたった。第3期は82年度まで続く。

真空リークの対策をし、この効果が現れ始めたのが83年度からで、87年度までを第4期、さらにこの期の半分になった88年度以降を第5期とした。

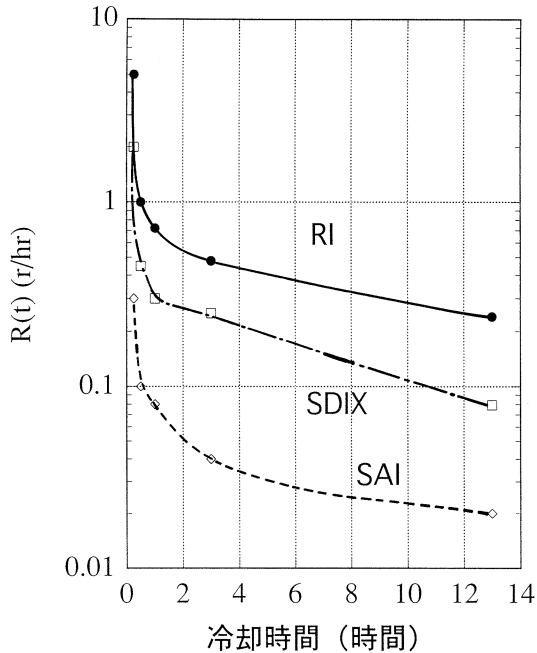
1) ビームを当てない(ビームロスモニタ)、2) 当たっても漏らさない(冷却する)、3) 調整時はビームの間引きを、4) ビームを目で確かめられる(ビームスクリーンモニタ)、5) 安定な加速などを考慮しながら改良、改造を行った。

## 11.2 各期の主な軽減策

### 11.2.1 第1期から第2期へ、初期故障などによる受難期<sup>33) 34)</sup>

被曝の伴う作業はビームによる真空リーク、スリットが動かなくなる、冷却水漏れなどが運転中に起こる故障と、加速管の交換、加速管モード変換器のマッチング調整、真空系の保守や改良、改造の工事等である。運転中の故障はこの期の初期にはほとんどすぐ修理をした。その場所は偏向系の最初の偏向電磁石の下流側のダクトのフランジがビームのエネルギーの広がりてたかかれ、暖められビームオフでさまされる熱サイクルで真空リークを起こすのである。増し締めで止まるのでほとんどすぐに修理をした。ただ増し締めも数回が限度でリークは止まらなくなる。同じような箇所が三つの偏向系にありこのフランジを溶接する事にした(68年、フランジレス化)。第1期はこのような弱いところの改善に負われ根本的な改良まで手が回らなかった。そこで作業被曝を少なくするため、すぐ修理をしないで待つことにした。作業現場の残留放射線の減衰を測定し、どの程度の待ち時間が適当であるかを判断した(第10図)。その当時は最低限翌朝まで待つことにした。

一方、実験グループの被曝量もかなりあり、その対策が講うじられた。中性子回折グループ(ND)は中性子発生用ターゲットをシールド(通称NDトーチカ、71年完成)した。また放射化学(RI)<sup>35) 36)</sup>は照射装置をシールドし、ある程度軽減することに成功した。



第10図 加速器停止後の残留放射能レベルの時間変化。

所を限定する。当たってもいい場所として、最初はスリットのみを想定した。しかし、ビーム取り出し窓、加速管のドアノブ、偏向電磁石用ビームダクトの入り口側にはどうしても当たることがあるので、必要な個所にコリメータをいれた。またビームの大きさ、位置が問題になるところにはテレビで大きさ、位置の確認ができるビームスクリーンを配置した。同時にビームを安定に加速することも行った<sup>37) 38) 39)</sup>。

#### 11.2.4 第四期から第五期

ビーム調整時の間引き運転、ビームロスモニター、ビームの安定化、ビーム観測用スクリーン等々の改善で89年には70年の30分の1まで減らすことが出来た。その後もこの作業被曝の少ない状態は続いている<sup>40)</sup>。

98年7月速動弁(QV)をゲート弁(GV)に変更した。作業はマシングループ以外の人の応援をも得て行った。総被曝線量は $400 \mu\text{Sv}$ で予定の半分で済んだ。この量は一時期の真空リークの時の半分以下である。

この仕事はマシングループを中心に行ってきたことをまとめたものである。筆者の仕事以外にも広く取り上げた。30年以上にわたって協力して下さった多くの方々に深く感謝します。又、本稿の執筆を勧めて下さった斎藤悌二郎氏、不確かなところを教えて下さった小山田正幸氏、栗原 亮氏に謝意を表します。

#### 11.2.2 第三期

ECSが完成して再び受難の時がやってきた。第8図に示されたように第二のピークが現れた。詳細は7.2 エネルギー圧縮装置を参照のされたい。又その年の9月に起きた真空系の浸水事故で作業を応援した人たちの作業被曝量を第1期に戻してしまった。82年まで種々対策を講じた。

#### 11.2.3 ビームを当てない

ビームが当たってもいい場

## 参 考 文 献

- 1) 三菱電機技報 42 2 (1968)
- 2) 鳥塚賀治, 小島融三, 浦澤茂一: 応用物理 37 (1968) 690.
- 3) 浦澤茂一: 加速器科学研究発表会報告集 1 (1975) 4.
- 4) 浦澤茂一, 栗原 亮, 高橋重伸, 柴崎義信, 小山田正幸: リニアック技術研究会報告集 23 (1998) 10.
- 5) 渡辺賢介 封 碧波, 栗原 亮, 中里俊晴, 小山田正幸, 柴崎義信, 高橋重伸, 浦澤茂一, 雪島正敏, 山川達也: 核理研研究報告 28 (1995) 83.
- 6) 雪島正敏, 封 碧波, 栗原 亮, 中里俊晴, 小山田正幸, 柴崎義信, 高橋重伸, 浦澤茂一, 渡辺賢介, 山川達也: 核理研研究報告 28 (1995) 96.
- 7) 小山田正幸: リニアック技術研究会報告集 5 (1980) 61.
- 8) 小野寺俊男, 家喜洋司: リニアック技術研究会報告集 1 (1976) 18.
- 9) 小野寺俊男, 家喜洋司, 大垣和美: リニアック技術研究会報告集 5 (1980) 57.
- 10) 浦澤茂一: リニアック技術研究会報告集 8 (1983) 26.
- 11) 栗原 亮, 一戸 隆, 柴崎義信, 根本重伸, 今野 收, 浦澤茂一: リニアック技術研究会報告集 1 (1976) 27.
- 12) 一戸 隆, 窪田健雄, 栗原 亮, 寺沢辰生: リニアック技術研究会報告集 4 (1979) 35.
- 13) 武藤正勝, 一戸 隆, 栗原 亮, 高橋重伸, 柴崎義信, 金森 浩, 浦澤茂一: 核理研研究報告 16 (1983) 333.
- 14) 浦澤茂一, 栗原 亮, 高橋重伸, 柴崎義信, 武藤正勝, 小山田正幸: リニアック技術研究会報告集 13 (1988) 19.
- 15) 武藤正勝, 柴崎義信, 大沼忠弘: 核理研研究報告 20 (1987) 393.
- 16) 今野 收, 浦澤茂一, 小山田正幸: リニアック技術研究会報告集 1 (1976) 8.
- 17) 今野 收, 栗原 亮, 一戸 隆, 柴崎義信, 根本重伸, 浦澤茂一: 核理研報告 11 (1978) 163.
- 18) 今野 收: リニアック技術研究会報告集 5 (1980) 161.
- 19) 浦澤茂一, 今野 收, 一戸 隆, 栗原 亮, 根本重伸, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 3 (1978) 7.
- 20) 鳥塚賀治, 一戸 隆, 浦澤茂一, 小山田正幸, 窪田健雄, 栗原 亮, 今野 收, 柴崎義信, 庄田勝房, 菅原真澄, 寺沢辰生, 中原和夫, 根本重伸, 武藤正勝: 加速器科学研究発表会

報告集 1 (1975) 90.

- 21) 鳥塚賀治, 一戸 隆, 浦澤茂一, 小山田正幸, 窪田健雄, 栗原 亮, 今野 收, 柴崎義信, 庄田勝房, 菅原真澄, 寺沢辰生, 中原和夫, 根本重伸, 武藤正勝: リニアック技術研究会報告集 1 (1976) 32.
- 22) 菅原真澄, 寺沢辰生: 核理研研究報告 9 (1976) 313.
- 23) 小山田正幸: 核理研研究報告 10 (1977) 149.
- 24) M. Sugawara, T. Ichinohe, S. Urasawa, M. Oyamada, T. Kubota, A. Kurihara, O. Konno, Y. Shibasaki, T. Terasawa, K. Nakahara, S. Nemoto, M. muto, K. Shoda and Y. Torizuka: Nucl. Instr. and Meth. **153** (1978) 343.
- 25) 浦澤茂一, 一戸 隆: 加速器・ストレージリングにおける超高真空技術研究会 1 (1975) 45.
- 26) 一戸 隆, 根本重伸, 柴崎義信, 浦澤茂一, 今野 收, 栗原 亮: リニアック技術研究会報告集 1 (1976) 25.
- 27) 今野 收: 加速器・ストレージリングにおける超高真空技術研究会 2 (1978) 1.
- 28) 根本重伸: リニアック技術研究会報告集 6 (1981) 6.
- 29) 高橋重伸, 小山田正幸, 浦澤茂一, 武藤正勝, 栗原 亮, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 11 (1986) 123.
- 30) 高橋重伸, 小山田正幸, 浦澤茂一, 中里俊晴, 栗原 亮, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 14 (1989) 325.
- 31) 高橋重伸, 小山田正幸, 浦澤茂一, 栗原 亮, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 17 (1992) 255.
- 32) 高橋重伸, 小山田正幸, 浦澤茂一, 中里俊晴, 栗原 亮, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 15 (1990) 187.
- 33) 渡辺 昇, 浦澤茂一, 近藤健次郎, 八木益男: 核理研研究報告 9 (1976) 209.
- 34) 今野 收, 浦澤茂一, 一戸 隆, 栗原 亮, 根本重伸, 柴崎義信: 核理研研究報告 11 (1978) 174.
- 35) 山寺 亮, 塩川孝信, 近藤健次郎, 八木益男, 浦澤茂一, 渡辺 昇: 核理研研究報告 9 (1976) 213.
- 36) 近藤健次郎, 八木益男, 渡辺 昇, 浦澤茂一: 核理研研究報告 11 (1978) 179.
- 37) 榎本和義, 新村信雄: 核理研研究報告 23 (1990) 154.



- 38) 浦澤茂一, 榎本和義, 新村信雄: リニアック技術研究会報告集 15 (1990) 273.
- 39) 栗原 亮, 浦澤茂一, 小山田正幸, 武藤正勝, 高橋重伸, 柴崎義信: リニアック技術研究会報告集 11 (1986) 7.
- 40) 榎本和義: リニアック技術研究会報告集 21 (1996) 135.

## 中性子エネルギー分解能向上のための 散乱電子飛行時間補正

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・高橋一憲

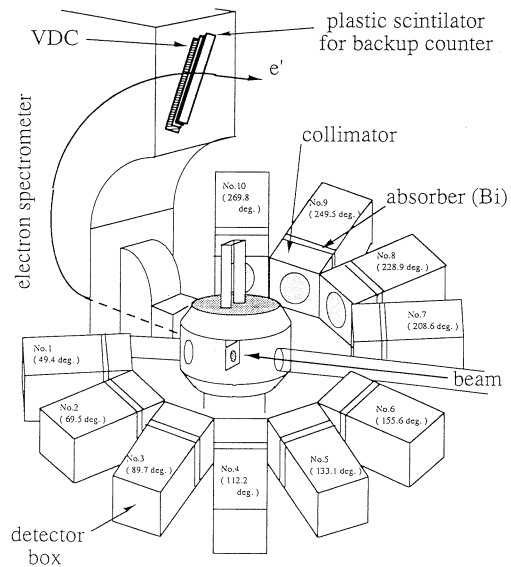
中川哲郎・中川武美\*・阿部 健\*\*

上野博昭\*\*\*

### § 1. はじめに

(e, e' n) 実験グループではこれまでに,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  核において主に巨大共鳴の崩壊に伴う放出中性子を散乱電子と同時計数する実験を行ってきた。今回この放出中性子のエネルギー分解能を向上させるための試みを行った。この報告では, まず (e, e' n) グループでの中性子検出の方法を紹介し, エネルギー分解能に寄与する要素とその補正法を述べ, 実際の実験データを用いた結果を報告する。

実験装置の配置を第1図に示す。散乱電子は LDM (Large Dipole Magnet) により運動量分析される。焦点面には VDC (Vertical Drift Chamber) があり, 散乱電子の入射位置と角度の情報が得られる。またその後ろにはバックアップカウンタがあり, 散乱電子検出系のトリガー信号を発生させる。中性子は散乱槽のまわりに設置された液体シンチレーションカウンタ (NE 213) により検出される。エネルギーは中性子検出器からの信号をスタートに, バックアップカウンタからの信号をストップ信号として飛行時間測定法 (TOF法) を用いて得ている。標的から中性子検出器までの距



第1図 (e, e' n) 実験装置配置図。

離すなわち TOF 距離は 1 m である。なお、検出中性子エネルギーは数 MeV から数十 MeV の領域である。

中性子の静止質量を  $M_n$  [MeV/c<sup>2</sup>], 運動量を  $P$  [MeV/c] とするとそのエネルギー  $E$  [MeV] は

$$E = \sqrt{(M_n c^2)^2 + (pc)^2} - M_n c^2 \quad (1)$$

である。また  $\beta = v/c = L/(ct)$  ( $v$ : 中性子の速度,  $c$ : 速度 とすると

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

であるから、これらより

$$E = M_n c^2 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{L}{c}\right)^2 \frac{1}{t^2}} - 1} \right\} \quad (3)$$

が得られる。ここで  $t$  は標的から中性子検出器までの中性子の飛行時間,  $L$  は TOF 距離である。測定では(3)で与えられるエネルギーは  $t$  と  $L$  のばらつきにより有限な分解能をもつが、それらの存在する理由として次の要因が考えられる。

#### 1. $t$ に関して

- (a) バックアップカウンタを構成するプラスチックシンチレーションカウンタ (NE102A + R1450光電子増倍管) の基本性能に基づく時間分解能。
- (b) バックアップカウンタのシンチレータ部分への散乱電子入射位置の違いによる信号読み出し時間のずれから生じる時間分解能。
- (c) 散乱電子の LDM 内の飛行時間のばらつきによる時間分解能。
- (d) 中性子検出器 (NE213 + R1250光電子増倍管) の基本性能に基づく時間分解能。
- (e) 回路系の時間分解能。

#### 2. $L$ に関して

中性子検出器が厚さ 10cm を持つことによる TOF 距離のばらつき。これは、入射中性子によるシンチレータの発光場所に 10cm (中性子の飛行方向) の不確定さがあるためである。

エネルギー分解能を  $\sigma_E$  (標準偏差) とすると、誤差の伝播法則を適用することで次式が得られる。

$$\sigma_E^2 = \left( \frac{\partial E(t)}{\partial t} \right)_0^2 \sigma_{t1}^2 + \left( \frac{\partial E(t)}{\partial t} \right)_0^2 \sigma_{t2}^2 \quad (4)$$

ここで  $\sigma_{t1}$  は先に挙げた 1. (a)~(e) による有限な時間分解能 (標準偏差) である。また、中性子検出器が有限な厚さをもつために同じエネルギーをもった中性子でも異なる時間で検出さ

れうるが、これによる時間分解能を  $\sigma_{t2}$  (標準偏差) と表した。( ) の下つき “0” は  $t$  にエネルギー  $E$  の中性子の TOF 距離 1 m の飛行時間を代入することを示す。

(4) の  $E(t)$  に(3)を代入して計算すれば、

$$\sigma_E = (E_n + M_n c^2) \frac{1}{\left(\frac{c}{L}\right)^2 t^2 - 1} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{t1}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t2}}{t}\right)^2} \quad (5)$$

となる。ここで  $t$  は(3)より

$$t = \left(\frac{L}{c}\right) \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{(M_n c^2)^2}{(E + M_n c^2)^2}}} \quad (6)$$

と与えられる。更に(6)より、

$$\frac{\sigma_{t2}}{t} = \frac{1}{t} \frac{\sigma_L}{c} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{(M_n c^2)^2}{(E + M_n c^2)^2}}} = \frac{\sigma_L}{L} \quad (7)$$

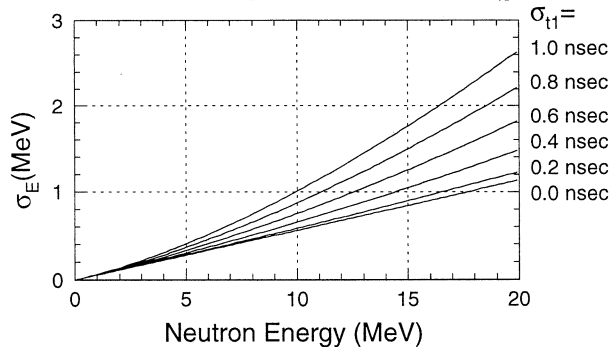
であり、 $\sigma_{t2}$  が入射中性子によるシンチレータの発光場所のばらつき  $\sigma_L$  (標準偏差) に変換される。したがって(5)は、

$$\sigma_E = (E_n + M_n c^2) \frac{1}{\left(\frac{c}{L}\right)^2 t^2 - 1} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{t1}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2} \quad (8)$$

となる。

これまでの (e, e' n) 実験では、何も補正を行わないときの時間分解能の実測値として  $\sigma_{t1} \sim 1$  nsec が得られている。また、厚さ 10 cm の中性子検出器の中性子検出効率は 30% 程度であるから、入射中性子によってシンチレータが発光する場所が厚さ 10 cm 間で一律であると仮定すると、 $\sigma_L = 10/\sqrt{12} = 2.89$  cm (一様な確率密度分布の標準偏差) となる。

第 2 図は中性子エネルギーに対する  $\sigma_E$  の関係をいくつかの  $\sigma_{t1}$  の値で計算したものである。



第 2 図 (8)式により計算された (e, e' n) 実験の中性子エネルギー分解能  $\sigma_E$ 。

$\sigma_{t1} \sim 0.2\text{nsec}$  以下では  $\sigma_{t1}$  よりも  $\sigma_L$  の寄与が主となり分解能はあまり向上しない。以上から、現在の実験装置と TOF 距離では、時間分解能  $\sigma_{t1}$  を向上させることでエネルギー分解能  $\sigma_E$  を向上できる余地があることが分かった。

そこで、 $\sigma_{t1}$  をどの程度まで小さくすることができるか、さきに述べた 1. (a)~(e)の要因別に見積もってみる。

- (a) 最近行われたテスト実験では  $\sigma_t = 0.352 (\pm 0.013)\text{nsec}$  が得られており、調整によりさらに向上すると考えられる。
- (b) VDC により得られる散乱電子の入射位置情報から、正確に補正することができる。実験的に得られたプラスチックシンチレータ内の光の伝播速度  $v = 0.1\text{m/nsec}$  を用いると、長さ  $48\text{cm}$  において  $4.8\text{nsec}$  の時間差が生じる。
- (c) VDC により得られる散乱電子の入射位置と角度情報から、散乱電子の LDM 内での飛行距離を計算することができ、補正することができる。散乱電子の運動量の違いにより  $\pm 1\text{nsec}$ 、LDM への入射角度の違いにより  $\pm 0.5\text{nsec}$  程度の時間のずれが生じる。
- (d) テスト実験では、 $\sigma_t = 0.274 (\pm 0.004)\text{nsec}$  が得られている。
- (e) テストパルスを回路に入力して調べたところ(a)や(d)に比べて無視できる量であることがわかった。

これらから、補正を行えば  $\sigma_{t1} = \sqrt{(a)^2 + (d)^2} = 0.45\text{nsec}$  程度まで時間分解能が向上するものと期待される。ただし、この程度に  $\sigma_{t1}$  の寄与が小さくなると、 $\sigma_L$  の寄与も影響する。よってあるエネルギー中性子の測定されるエネルギー分布は、ある幅の一様分布に近くなると考えられる。その幅は、 $\sqrt{12}\sigma_E$  で与えられる。今回は、(c)の補正を行うことを試みた。次節でその方法を述べる。

## § 2. LDM 内の散乱電子飛行時間の補正方法

標的から焦点面までの散乱電子の飛行距離を計算し、飛行時間に直す方法を用いた。LDM では磁場分布

$$B_y = B_0 \left[ 1 - n \frac{x}{\rho} + \beta \frac{x}{\rho} + \left( \frac{n}{2} - \beta \right) \left( \frac{y}{\rho} \right) + \dots \right] \quad (9)$$

$$B_x = B_0 \left[ -n \frac{x}{\rho} + 2\beta \frac{xy}{\rho^2} + \dots \right] \quad (10)$$

において、 $n=1/2$ ととっているために同じ運動量の軌道は  $x, y$  方向ともに(1次の項に関して)

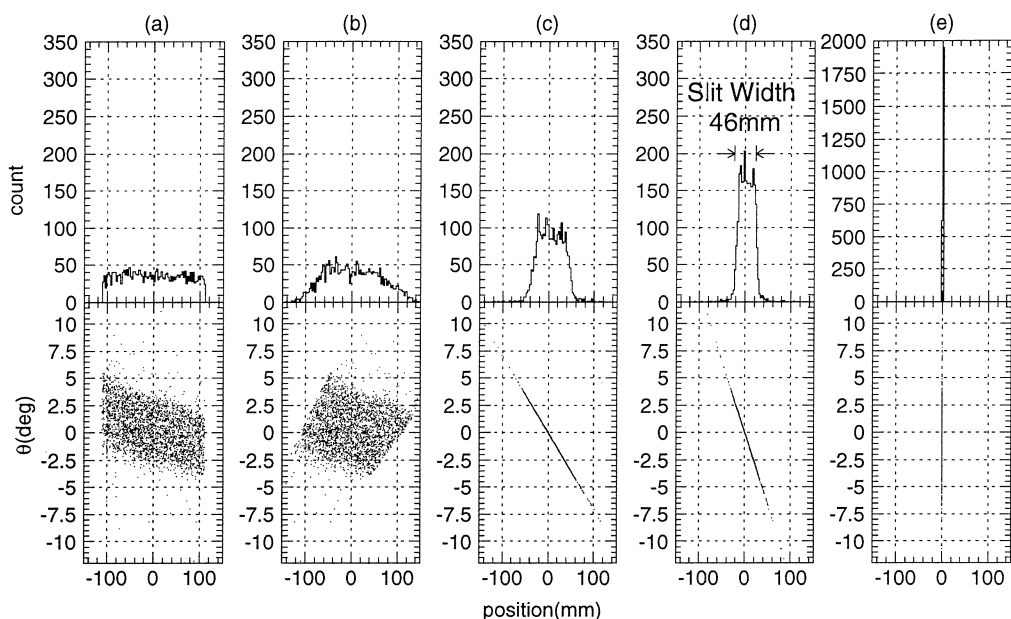
焦点面で集束する (double focusing)。また,  $\beta = 1/4$ , 偏向角  $\alpha = 2\sqrt{2}/3$  (magic angle) とすることで, 2 次の項 ( $(x_f | x_0^2)$ ,  $(x_f | x_0\theta_0)$ ,  $(x_f | \theta_0^2)$ ) がゼロとなっている<sup>1)</sup>。VDC は中心軌道の作る平面に垂直方向 (y 方向) の情報は与えない。しかしながら, 磁場内で散乱電子の通ることのできる y 軸方向の幅はわずか65mm弱であり<sup>2)</sup>, 標的から焦点面までの中心軌道長6,594mmに比べ大変小さい。よって, y 軸方向への軌道の変化量は最大1mm ならずであり無視できる。それゆえ, 以後は, x 軸方向に関する散乱電子飛行距離の違いのみ考える。

軌道計算は, i) 標的から磁場入口まで, ii) 磁場入口から出口まで, iii) 磁場出口から焦点面まで, の3部分に分け, 焦点面での散乱電子入射位置, 角度情報から, 標的の位置まで飛跡を計算していくことで行なった。i), iii) は自由空間とした。また ii) については磁場端の影響は考慮せず (Sharp Cut off 近似), (9)で表される磁場分布をもとに得られる次の変換行列を用いた<sup>1)</sup>。

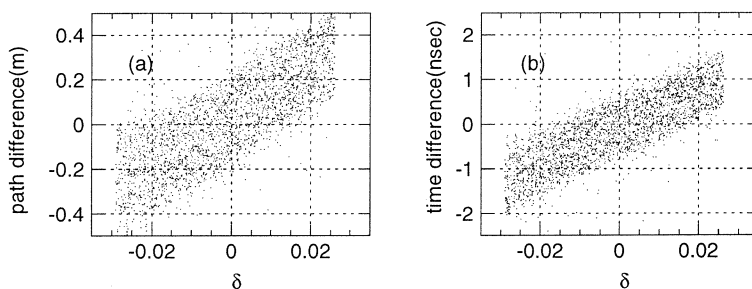
$$\begin{bmatrix} x' \\ \theta' \\ \delta' \\ l' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.4999 & 1.225 & 3.000 & 0 & 0 & 0 & 0.9071 & 0 & 3.802 & 1.186 \\ -0.6124 & -0.4999 & 1.225 & 0 & 0 & 0 & 1.161 & 0 & 0.9067 & -1.097 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.225 & 3.000 & 3.474 & 0 & -0.3062 & -1.500 & 2.578 & 0.6124 & -4.813 & -0.4563 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \delta \\ l \\ x^2 \\ x\theta \\ \theta^2 \\ \delta^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで,  $x, \theta, \delta, l$  は磁場端での中心軌道に対する x 方向の変位 [m], 角度 [rad], 運動量の中心軌道のそれに対する変位, そして軌道長の中心軌道のそれに対する変位である。 $x', \theta', \delta', l'$  はそれぞれ反対の磁場端でのパラメータである。なお, 実際の実験ではビームポジションのずれは小さいため, 焦点面への散乱電子の入射位置, 角度はそれには影響されていないものとみなす。

<sup>16</sup>O (e, e'n) 実験 (1993年5月) のデータを使って計算の様子を確認した。第3図は計算されたいろいろな場所での軌道の分布を示している。(d)はLDMのスリット位置での軌道の分布であり, 実際のスリットの鉛直方向の幅46mmと一致している。また(e)は確かに標的に計算された軌道が集束していることを示す。第4図(a)は運動量の変位を横軸として標的から焦点面までの軌道長の変位をプロットしたものである。運動量が  $\delta = \pm 0.025$  異なると軌道長は  $\pm 0.3$ m異なることがわかる。また, 同じ  $\delta$  でも LDM への入射角度の違いにより最大  $\pm 0.15$ m 程度違いが生じる。(b)は軌道長を飛行時間に変換したものであり,  $\delta$  の違いで  $\pm 1$  nsec, 入射角度の違いで  $\pm 0.5$  nsec 変化するとうことがわかる。



第3図 計算された散乱電子軌道の分布。横軸は各場所での x 方向の位置で、中心軌道の位置を原点としている。上図はその度数分布を表す。下図は縦軸に各場所での軌道の中心軌道に対する傾きをとった2次元プロットである。各場所は、(a)Focal-plane, (b)磁場出口, (c)磁場入口, (d)スリットの位置 (標的から443mm), (e)標的の位置。



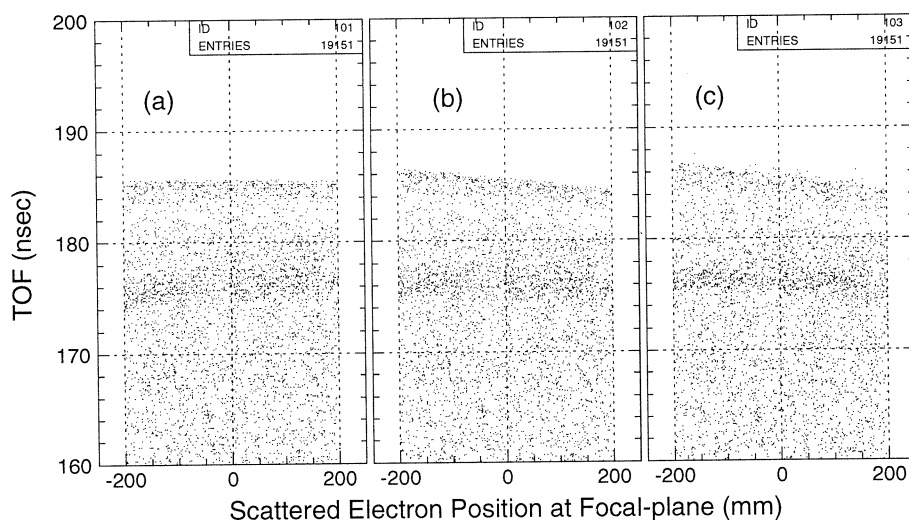
第4図 散乱電子の分布。(a): 横軸に運動量(中心軌道の運動量に対する違い  $\delta$  で表す)、縦軸に軌道長(中心軌道の軌道長からの違い)をとった2次元プロット。(b): (a)で縦軸を散乱電子飛行時間(中心軌道の飛行時間との違い)にしたもの。なお計算には、散乱電子検出効率の低くなる  $\delta$  の大きい部分はカットしてある。

### § 3. $^{16}\text{O}$ (e, e'n) 実験データでみた補正の効果

先の補正方法の効果を見るために、 $^{16}\text{O}$  (e, e'n) 実験のデータを用いた。時間分解能  $\sigma_{t1}$  へ

の効果を見るために  $\gamma$ -flash 事象を解析した。この事象は、散乱電子を LDM で、標的からの  $\gamma$  線を中性子検出器が同時計数した事象であり、励起された標的核が  $\gamma$  線を放出して崩壊する過程や入射電子の制動放射の過程によるものである。そのため、TOF スペクトル上に線スペクトルとして現れる。そして、 $\gamma$  線事象の TOF スペクトルでは中性子検出器の厚みの影響は無視できるため、時間分解能  $\sigma_{t1}$  を直接測定することができる。

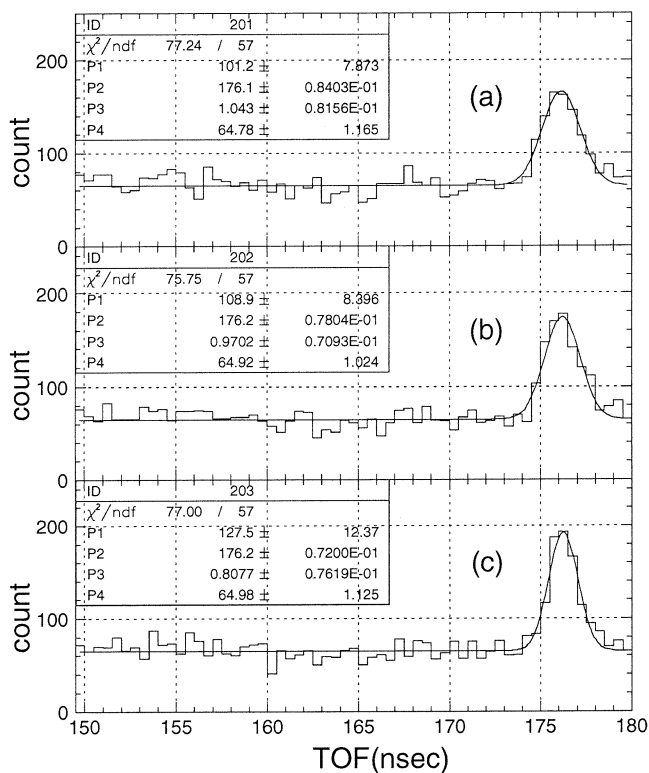
第 5 図は散乱電子と  $\gamma$  線との同時計数事象において、散乱電子の焦点面での位置と  $\gamma$  線の飛行時間の 2 次元プロットを示したもので、均一な偶然同時計数事象の中の濃いラインが  $\gamma$ -flash 事象である。(a) は TOF に何も補正を行わなかった場合である。 $\gamma$ -flash が傾いているのは、バックアップカウンタの信号を片側（高運動量側）の PMT からの読み出しを使っているため、信号読み出しまでの時間に入射位置に依存した差が生じるためである。LDM 内の散乱電子飛行距離は高運動量のほうが長く、そのため TOF が遅れる方に働くが、バックアップカウンタの信号読み出しは逆の方向（早くなる方）に働くため、打ち消されている。(b) は (a) を傾けて  $\gamma$ -flash を水平にしたものである。(c) は先の散乱電子の飛行時間の補正とバックアップカウンタの信号読み出しの補正を行った結果であり、 $\gamma$ -flash の分布が狭まって濃くなっているのがわかる。



第 5 図  $^{16}\text{O}$  ( $e, e'n$ ) 実験で観測された散乱電子- $\gamma$  線同時計数事象。横軸に Focal-plane 面への散乱電子の入射位置、縦軸に TOF をとった 2 次元プロット。(a) : 何も補正をしなかった時。(b) : (a) の図を傾けて  $\gamma$ -flash を水平にしたもの。(c) : 散乱電子飛行時間とバックアップカウンタ信号読みだし時間を補正したもの。



第6図は第5図を縦軸方向に射影したものであり、 $\gamma$ -flash ピークをガウシアンでフィットし、その標準偏差をもとめた。結果は第1表ようになった。補正を行うことで時間分解能 $\sigma_{fl}$ を向上させることができた。しかし、表中(c)の値は、§1での見積もりには達していない。これは、この実験時のバックアップカウンタの時間分解能が極めて悪かったためと考えられる。バックアップカウンタの両端のPMTからの信号を使ってカウンタ自身の時間分解能を求めたところ、実験時の片方のPMTからの信号の時間分解能は $0.664 (\pm 0.008)$  nsec (標準偏差)であったことがわかった。このため今回の時間分解能は期待値に達しなかったものと考えられる。



第6図 第5図(a), (b), (c)において、TOF軸に射影したもの。P3値はガウシアン標準偏差を示す。

第1表 散乱電子の補正前と補正後の $\sigma_{11}$ の変化。(a), (b), (c)は第6図と対応している。

	$\sigma_{11}$
(a)	1.04 ( $\pm 0.08$ )
(b)	0.97 ( $\pm 0.07$ )
(c)	0.81 ( $\pm 0.08$ )

#### § 4. まとめ

測定中性子のエネルギー分解能を向上させる方法を検討し、LDM内の散乱電子の飛行時間の補正を試みた。 $^{16}\text{O}$  (e, e' n) 実験のデータでは、バックアップカウンタの時間分解能の低さから期待値 (0.45nsec) には達しなかったものの、補正の効果を確認することができた。次期の (e, e' n) 実験では、バックアップカウンタを改良することで期待値に近いエネルギー分解能が得られるものと考ええる。

#### 参 考 文 献

- 1) 菅原 真澄 : Internal Report 粒子軌道解析.
- 2) 菅原 真澄 : フローティング・ワイヤー法による電磁石スペクトロメータの収束性能検証,  
LNS Report June, 1998.

## 偏極重水素標的の解離度および 偏極度測定用イオン抜き出し系の試作

核理研, 理学研究科物理\*

西川 至・玉江忠明・今野 収

佐藤祥幸・阿部和廣・横川民雄

宮瀬晴久\*・坪田博明\*・田中英二\*

### § 1. 核理研での偏極重陽子標的開発とこの研究の動機

東北大学理学研究科附属原子核物理学研究施設(核理研)に完成されたストレッチャー・ブースタリングには内部標的実験用に3 mの直線部が設けられており, テンソル偏極重陽子を内部気体標的とした1.2 GeV電子線による実験を行うことが考えられている。重陽子はスピンの1であり, そのアンサンブルは核スピンの磁気量子数に関して二次の偏極モーメントを持ちうる。この二次の偏極モーメントを持っている重陽子のアンサンブルはテンソル偏極していると表現され, テンソル偏極した重陽子と電子との弾性散乱実験によって, その四重極電気形状因子を, 分解反応によって相対論的効果, 核子外自由度の寄与を精度良く調べることができる。

核理研での偏極重陽子の生成には, オプティカルポンピング法<sup>1)</sup>が採用されている。この方法ではまず, 円偏光にしたTi:Sapphireレーザー光をガラスセル中のルビジウム蒸気に照射して, 電子スピンの向きの揃った基底状態ルビジウム原子気体を生成し, このセルに重水素分子をRF放電によって解離して得た重水素原子を流しこみ, スピン交換反応を起こさせ, 電子スピンの向きの揃った基底状態重水素原子を得る。核理研ではこの重水素原子から, 断熱通過法などを用いて重陽子をテンソル偏極させることが考えられている。

この偏極重陽子の生成過程において, 重水素分子ガスを十分に解離させ, 核偏極させるまでその状態を保つこと, 及び, 上記の偏極生成過程を最適化することが重要である。この二つのことを具体化させるには, 重水素ガスの解離状態を評価する手段を得ること, 及び重陽子の磁気量子数分布を評価する手段を得ることが必要である。前者の手段として重水素ガスを一部イオン化して抜き出し, ヴィーンフィルター型質量分析器にかける方法を採用することにした。被測定重水素原子は内壁表面と衝突して再結合を起こし重水素分子ガスへと緩和していくが, 被測定領域でイオン化して抜き出すことにより, 測定系における再結合の問題を避けることが

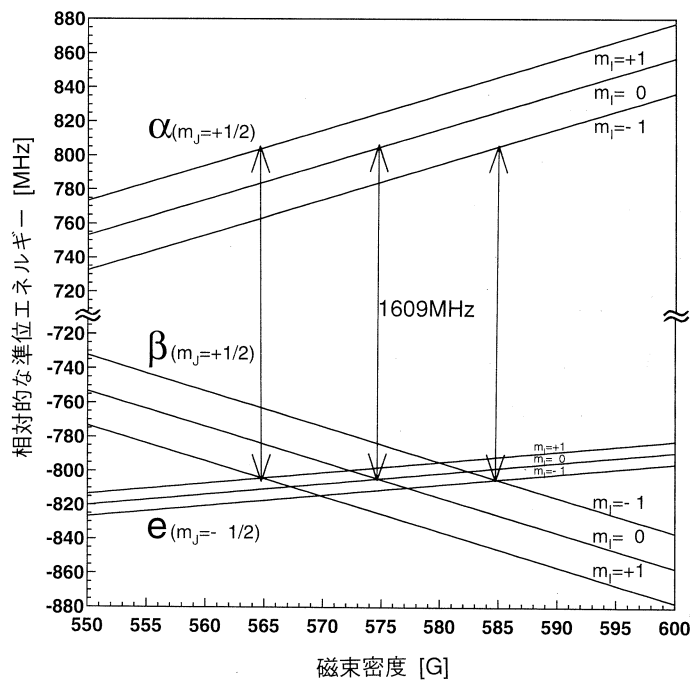
できる。

後者の手段として重水素ガスを一部イオン化して抜き出し、Lamb シフト型偏極度計<sup>2)</sup>にかける方法を採用することにした。前記の解離度測定用のイオン抜き出し部が入射部の役割を果たす。この方法は、偏極分解能が既知の核反応を用いる場合に比べ、放射線の問題が無く、高エネルギー加速を必要としないため、費用その他の点で有利な面があると考えられた。

この研究では、両者に共通するイオン抜き出し系、質量分析系の準備、試作、テストを行い、またLamb シフト型偏極度計で必要となる  $2S_{1/2}$  重水素原子生成系、測定系を準備・試作した<sup>3)</sup>。

## § 2. Lamb シフト型偏極度計について

水素型原子の  $2S_{1/2}$  状態特有の性質を利用して、この状態に、特定の磁気量子数を持つ原子核のみを残す方法はLamb シフト法と呼ばれている。この方法は偏極イオン源に、またその偏極度測定に従来から用いられている。以下にこの方法の中心となる「スピンスフィルター」<sup>4, 5)</sup>の原理について述べる。



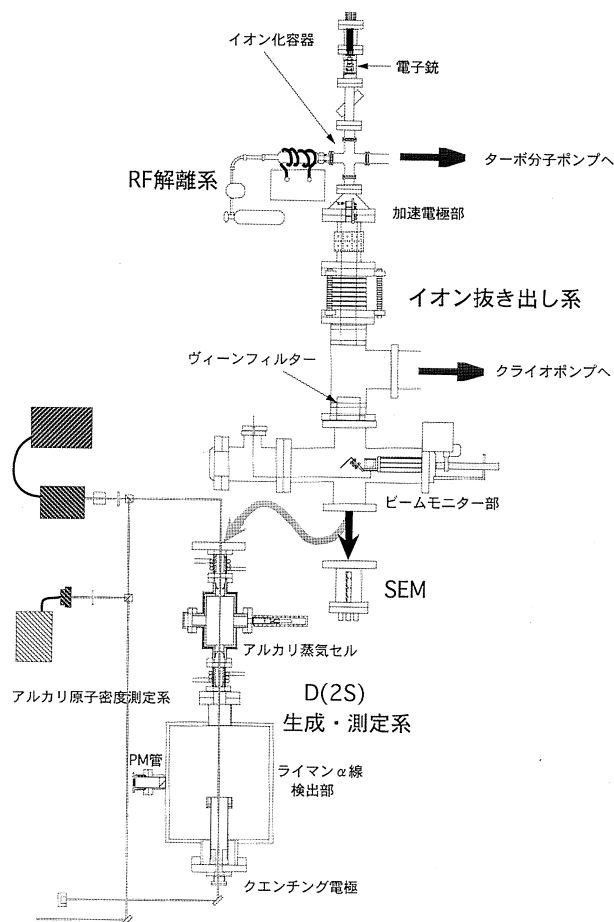
第1図 磁場中での重水素原子の  $2S_{1/2}$  状態 ( $\alpha$  および  $\beta$ ) と  $2P_{1/2}$  状態のエネルギー準位図。

重水素原子の  $2S_{1/2}$  状態 (寿命  $\sim 1/7$ sec) の準位図を第1図に示す。図中の  $\beta$  状態は磁束密度が550Gから600Gの磁場中では  $2P_{1/2}$  の  $e$  状態と準位が交叉している。準位交差の起こる程度の強さの磁場中では、この状態は、この磁場と垂直な静電場により  $e$  状態 (寿命  $\sim 1.6$ nsec) と強くシュタルク効果による混合を起こして寿命が短くなるという性質を持っている<sup>6)</sup>。また  $\alpha$  状態は、 $e$  状態とのエネルギー差に相当する周波数を持つ磁場と平行な振動電場中では、 $e$  状態とシュタルク混合を起こして寿命が短くなる。この準位交叉が起こる程度の磁場、それと垂直な静電場、平行な振動電場が存在し、さらにこの振動場の周波数が、正確に  $\alpha$ - $\beta$  間のエネルギー差に一致していると  $\alpha$ - $e$ - $\beta$  状態間に「三準位相互作用」<sup>7)</sup> が起こる。この相互作用では、 $\alpha$ - $e$  状態間の相互作用と、 $\beta$ - $e$  状態間の相互作用の位相が  $e$  状態を打ち消しあうように干渉しており、結果として  $\alpha$ 、 $\beta$  状態の寿命は短くはならない。例えば、重陽子の磁気量子数  $m_l = 0$  の  $\beta$  状態と  $e$  状態の自然幅の重心が準位交叉するのは、磁場が575Gのときであり、 $m_l = 0$  の  $\alpha$ - $\beta$  状態間のエネルギー差は1609MHzとなる。このとき他の  $m_l$  を有する  $\alpha$ - $\beta$  状態間のエネルギー差はこの前後に約27MHz離れたものとなっているので「三準位相互作用」は働かず、他の  $m_l$  を有する  $\alpha$  および  $\beta$  状態の重水素原子はシュタルク混合により、基底状態へと短時間で崩壊する。このように上記の、磁場と平行な振動電場として1609MHzを含む周波数幅の十分せまいものを用いると、 $2S_{1/2}$  状態にある重水素原子のうち  $m_l = 0$  の重陽子を持つもののみを崩壊させずに残すことができる。残った  $2S_{1/2}$  状態重水素原子の数を数えると、上記の電場との相互作用を受ける前の  $m_l = 0$  の重陽子の数を推定できる。同様の原理で、565G585Gの磁場と1609MHz近傍の磁場と平行な振動電場と、磁場と垂直な静電場を用いることにより、 $m_l = 1$ 、 $m_l = -1$  にある重陽子の数を推定できる。以上が「スピフィルター」の原理に基づく重陽子偏極度計の概要である。核理研で試作するLambシフト型偏極度計については、 $2S_{1/2}$  状態の生成法としてアルカリ原子との荷電交換反応を、その荷電交換反応に用いる入射ビーム生成に標的重水素ガスからのイオン抜き出しを、「スピフィルター」を通過してきた  $2S_{1/2}$  状態重水素原子の数を数える方法として、静電場によるシュタルククエンチング時に放出されるライマン  $\alpha$  線の計数を用いることにしている。

### § 3. 実験装置

この研究で試作したイオン抜き出し系、 $2S_{1/2}$  重水素原子生成・測定部を含む実験装置の全体図を第2図に掲げる。重水素からのイオンビーム抜き出し法としては、ブラウン管用電子銃からの電子ビーム照射によるイオン化、漏れ電場による抜き出し、円筒電極によるビーム生

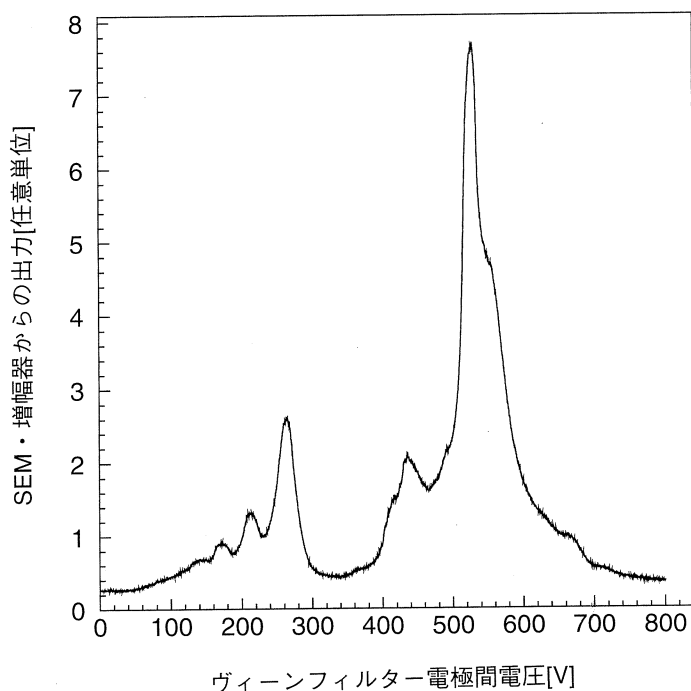
成という方法を採用した。測定時、イオン化部には1 kV 程度の正電圧が印加され、電子はカソードから1 keV 程度のエネルギーを持ってイオン化部に入射し、イオン化容器に流入した重水素ガスの一部は最終的に1 keV 程度のエネルギーを持ったイオンビームとして抜き出される。このイオン抜き出し部と永久磁石を用いたヴィーンフィルターで質量分析系をなす。この質量分析系を透過させられた重水素原子イオンまたは重水素分子イオンは銅製のアルカリ原子蒸気セルへと入射し、アルカリ原子との荷電交換反応によって  $2S_{1/2}$  重水素原子が生成され、その生成量が後方に配置された、シュタルククエンチング法によるライマン  $\alpha$  線検出部<sup>8)</sup>にて評価される。上記のイオン加速用円筒電極によるイオンビーム形成、ヴィーンフィルターによる質量分析、シュタルククエンチング用電極が生成する電場、それによるクエンチングの様子などは各部設計前に FORTRAN のプログラムによってシュミレーション計算をしている。



第2図 実験装置全体図。

#### § 4. イオン引きだし・質量分析系のテスト

第2図にあるイオン抜き出し系を用いて重水素分子ガスの質量分析を行った。イオン検出には図にあるように、SEM（二次電子増倍管）、ファラデーカップを用いた。質量スペクトルの一例を第3図に示す。この測定は電子銃の加速電圧1100V、イオンの加速電圧1100V、重水素ガス流量0.040cc/minで行っている。第3図で横軸はヴィーンフィルター電極間電圧、縦軸はヴィーンフィルターを透過したイオン電流のSEMおよび増幅器を通した出力である。530V付近での大きなピークは重水素分子イオンによるもので、図の左半分にあるピークは残留ガスによるものである。ファラデーカップでのイオン電流値は重水素分子イオンに対して $0.17\mu\text{A}$ であった。



第3図 質量スペクトルの例。

#### § 5. まとめと今後

試作した実験装置のうち、イオン抜き出し、質量分析系は目的の、中性ガスの質量分析に使える程度のものであることが実際にテストを行うことにより分かった。今後、RF 解離器の最適化、重水素原子の再結合の低減化を図るための測定系としてさらに改良を加えていく。また、生成するイオンビームを既に試作している  $2\text{S}_{1/2}$  重水素原子生成・測定系に入射させ、その

テストを行い、Lambシフト型偏極度計の実現の見通しを立てることが早期の課題となっている。

この試作にあたっては、東芝ホクト電子株式会社のブラウン管営業部の方に御無理にも電子銃を試供していただきました。ここに感謝いたします。

### 参 考 文 献

- 1) 高橋哲宗：修士論文，東北大学，1994.
- 2) S. K. Lemieux *et al.* : NIM A **333** (1993) 434.
- 3) 西川 至：修士論文，東北大学，1998.
- 4) J. L. Mckibben and G. G. Ohlsen : Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 1180.
- 5) G. G. Ohlsen and J. L. Mckibben : LASL Report LA-3725 (1967).
- 6) H. E. Bethe and E. E. Salpeter : *Quantum Mechanics of One and Two Electron Atoms* (Academic, New York, 1957).
- 7) W. E. Lamb : Phys Rev. **85** (1952) 259.
- 8) P. Pradel *et al.* : Phys. Rev. A. **10** (1974) 797.



# Data Acquisition System using Windows NT™ Workstation

M. Kawabata and M. Mutoh

*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Sendai  
982-0826, Japan*

A data acquisition system, where the Windows NT™ was used for an operating system on the data taking computer, has been developed for the first time. This system showed sufficient performance in the data acquisition with standard CAMAC modules, and up to 410 KB/sec of data, for the present, were taken without any dead time.

## §1. Introduction

Requirements for an operating system (OS) on the computer used in the data acquisition (DAQ) system may be a real-time response to an interrupt from peripheral devices, and a reliability on its tasks. The VAX/VMS system, which is a real-time system, has been traditionally used in the DAQ purpose in nuclear and high energy physics experiments, due to these requirements. Recently, the Linux OS, which is not a real-time OS, has been widely used as the OS for DAQ systems on high-performance and low-cost personal computers, due to its fast real-time response<sup>1,2)</sup> and its portability. Is it possible, then, that the Windows NT™, which is not a real-time OS, neither, be used in the DAQ purpose? This OS is a multitask OS with a graphical user interface (GUI), and is widely used on personal computers. The GUI is an attractive characteristic of this OS, since this would reduce mistakes in DAQ operations.

In this paper, we report on the development of the DAQ system using Windows NT, named "NewKoala", and show its performance in the DAQ tasks with standard CAMAC modules.

## §2. Overview of the NewKoala

Figure 1 shows a schematic layout of the DAQ system, "NewKoala", which is supposed

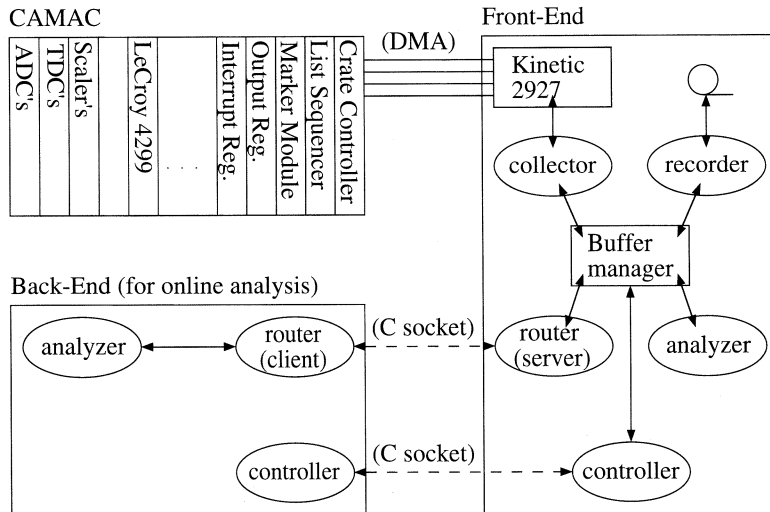


Fig. 1. Schematic layout of the DAQ system, "NewKoala". This system consists of CAMAC modules, a Front-End and several number of Back-End computers.

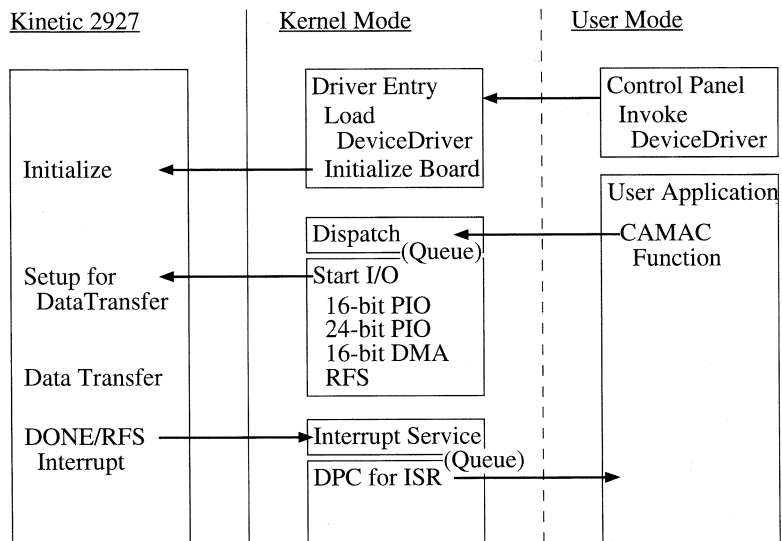


Fig. 2. Schematic figure to show how a user application interacts with a peripheral device, Kinetic 2927 Interface card.

to be used in  $(e,e'p)$  or  $(e,e'n)$  measurement at Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. This system consists of three parts, CAMAC modules with a Kinetic 3922 Crate Controller and a Kinetic 3982 List Sequencer (L.S.), a Front-End computer for the data acquisition (Gateway2000 GP6-333) with the OS, Windows NT™ Workstation Ver. 4.0, and several number of Back-End computers for an online data analysis. The Front-End computer has a Kinetic 2927 Interface card to interact with CAMAC modules. The Front-End computer and the Back-End computer are connected through Ethernet. Any kind of the OS is allowed for the Back-End computer, as long as a C-socket programming is available on it. For the present, UNIX (or Linux), OpenVMS, or Windows NT is supposed for the OS of the Back-End computer.

With an event trigger from some experimental apparatus, the L.S. initiates list sequencing to read data in CAMAC modules, for example, an Input Register, ADC's, TDC's, and a LeCroy 4299 Databus Interface, according to the CAMAC command list which is preloaded in a 16 KB Random Access Memory (RAM) of the L.S. These data are accumulated in the 8 KB FIFO memory of the L.S. When one-half of the FIFO memory is full, the L.S. generates a Look at Me (LAM). On this LAM, the Front-End computer is interrupted and reads data in the FIFO memory by DMA data transfer through the Kinetic 2927 Interface card. On the Front-End computer, the data, transferred from the L.S., are rearranged in the "NewKoala" data format with 16 KB length, and all the data buffers are recorded on a hard disk. Scaler data are accumulated separately, when the 16 KB data buffer is full. Some of the data buffers are transferred through Ethernet to the Back-End computer for the online data analysis

### 2.1 *Device Driver for Kinetic 2927*

On the Windows NT, a user application can interact with peripheral devices only through device drivers, which run in Kernel mode of the OS. The device driver for the Kinetic 2927 Interface card was constructed using Microsoft Windows NT™ Device Driver Kit (DDK) and WinDK™ DDK Class Library, BlueWaterSystems, Inc.

As shown in Fig. 2, the device driver for the Kinetic 2927 consists of a Driver Entry routine, a Dispatch routine, and an Interrupt Service routine (ISR). The Driver Entry

routinene is called from a “Control Panel” of the Windows NT. This routine loads the Dispatch routine and the ISR into the OS, and initializes the Kinetic 2927. The Dispatch routine sets up for the Kinetic 2927, according to the kind of CAMAC commands from a user application, like as a 16-bit programmed I/O (PIO), a 24-bit PIO, a 16-bit DMA transfer, and waiting for a Request for Service (RFS) interrupt. All the data transfers are terminated with DONE interrupts. The ISR is called with a DONE or RFS interrupt from the Kinetic 2927. This routine hands transferred data to the user application and resets the Kinetic 2927.

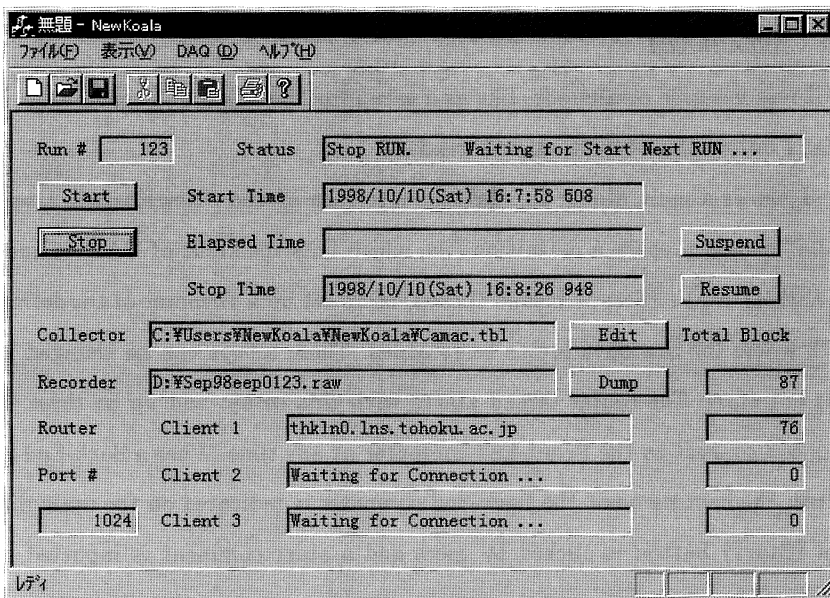


Fig. 3. A main dialog for the user interface of the “NewKoala”.

## 2.2 DAQ application with GUI

The DAQ application on the Front-End computer consists of several thread routines for the GUI and DAQ tasks. It is true that the GUI has advantage to reduce mistakes in DAQ operations, but the GUI may prevent DAQ tasks, because it takes much time to redraw a graphical display. It is necessary, therefore, that the GUI and other DAQ tasks should be separated each other, by using a multithread programming.

A main thread manages the GUI and the status of other threads. The DAQ tasks in the

application are 1) data acquisition from CAMAC modules (Collector), 2) recording data buffers on a hard disk (Recorder), and 3) sending some of data buffers to the Back-End computers (Router and Server). These tasks are performed in different threads. Since there exists more than two threads which handle data buffers, a buffer manager thread is also necessary to deliver data buffers to these threads in correct order and with appropriate priorities.

All source codes were written in C++ Language, and the Microsoft Visual C++ Ver. 5.0 compiler was used.

### 2.2.1 *Main thread*

The GUI receives user commands, like as a setup for the DAQ and start/stop of RUN, and displays informations from other threads.

Figure 3 shows a main dialog for the user interface of the “NewKoala”. Users of the “NewKoala” should prepare a definition file, which lists the kinds of CAMAC modules to be used. With [DAQ] - [Setup] menus clicked, users set up a filename of the definition file and a path where the raw data are to be recorded. These setups can be changed whenever RUN does not start. The router thread starts with this setup, and up to three Back-End computers can connect to the Front-End computer at any time. When a Back-End computer is connected, the host-name of the Back-End computer is indicated on the main dialog.

When a [Start] button is clicked by users and a start comment is inputted, the next RUN starts, and the collector and the recorder threads start execution. The collector thread initializes CAMAC modules, according to the definition file, and begins to wait for a LAM from the L.S. Total number of data buffers, which are recorded on a hard disk, is indicated on the main dialog. When any Back-End computer is connected, number of data blocks, which is sent to it, is also indicated. These numbers are updated once per second.

To stop RUN, a [Stop] button is clicked and a RUN stop comment is inputted. The collector thread reads last data from the L.S. and disables CAMAC modules. The recorder thread terminates when all the data are recorded on a hard disk.

The DAQ application is terminated with [File] - [End] menus clicked. The main thread, then, terminates the server and the router threads, with any existing C-socket closed.

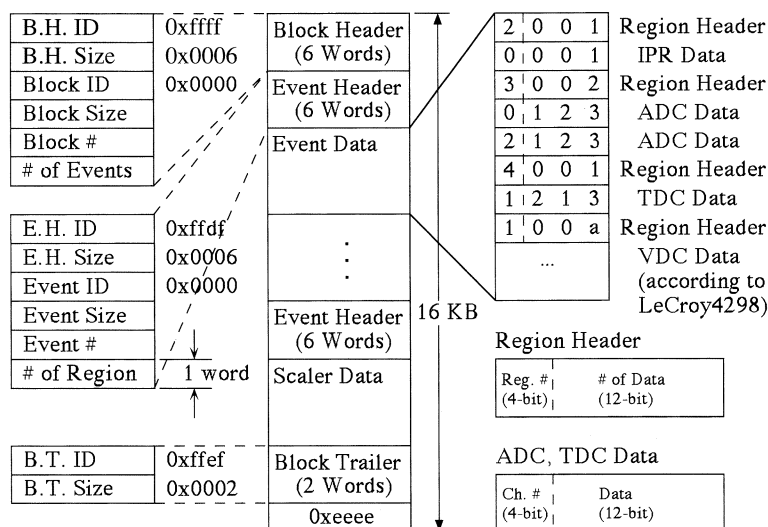


Fig. 4. Event data format in the "NewKoala".

### 2.2.2 Collector

The collector thread is created when a user starts RUN. Functions of this thread are 1) to wait for a RFS interrupt from the Kinetic 2927, which corresponds to a LAM from the L.S., 2) to receive one-half of the L.S. FIFO memory, by 16-bit DMA transfer through the Kinetic 2927, 3) to convert these data in a prescribed data format, to be described below, 4) to read scaler's data separately by 24-bit PIO, just before the data buffer becomes 16 KB length, and 5) to rewrite the content of the data buffer, while the buffer manager allows to have it.

While it reads scaler's data and it requires the buffer manager to have access to the data buffer, the collector disables a Marker Module (M.M.), as to be described below, and the data taking task is suspended. When the L.S. happens to cease list sequencing due to the overflow of the FIFO memory, the data acquisition is also suspended and the CAMAC modules are reset.

Figure 4 shows a data format for an event block, prescribed in the "NewKoala". Every data block, including comment blocks, has a 16 KB length. Each block has a block header

Table 1. Definition of the region numbers.

Region #	CAMAC module
0x1	VDC's (LeCroy 4299)
0x2	Input Register
0x3	ADC's (LDM Spectrometer)
0x4	TDC's (LDM-SSD's)
0xa	ADC's (SSD's)
0xb	ADC's (Neutron detector)
0xf	Scaler's

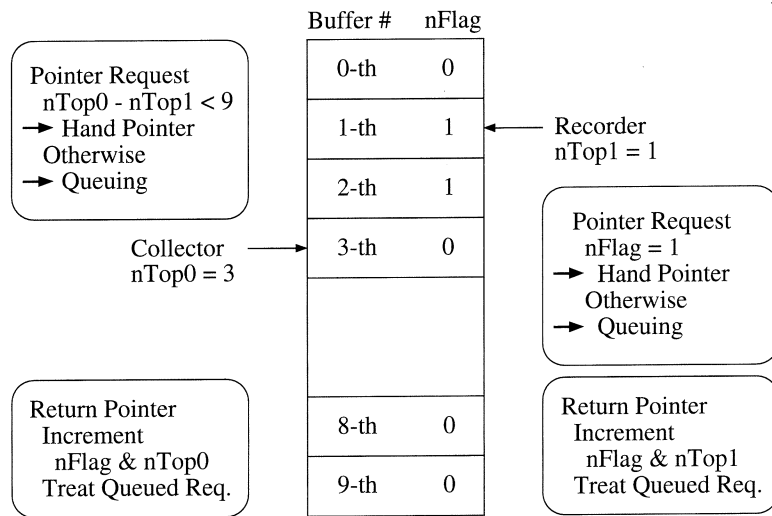


Fig. 5. Schematic figure to show how the buffer manager delivers the data buffers.

with 6 words, and a block trailer with 2 words. The block header includes informations of a block number, a data length, and the number of events in this block. Each event data, in the event block, consists of an event header and actual data of ADC's, TDC's, LeCroy 4299, and Scaler's. The event header indicates a event number, a event length, and the number of region headers, as described below. The actual data are sorted according to kinds of CAMAC modules. Each of the sorted data has a region header, which indicate the kind of CAMAC modules, as listed in Table 1 and the number of words for the data. Upper 4-bits of each data word for ADC's and TDC's are used to express a subaddress of the corresponding module, to enable to compress the data. Data format for VDC's is the same as those from LeCroy 4298 TDC Controller, including a delineating word.

These headers would help us to construct analyzer programs in flexible ways. This data format is constructed on the analogy of those used in Tamii-system<sup>3)</sup> and Ichihara-system.

### 2.2.3 Buffer Manager

The buffer manager, used in the “NewKoala”, works in a simple logic (Fig. 5). Ten data buffers with 16 KB length are prepared in the main thread. All threads, the collector, the recorder and the server, commonly have pointers to these data buffers. They can read or rewrite the contents of the data buffers, only when the buffer manager allows them to have access. The buffer manager delivers the data buffers so that each of the data buffers is rewritten or read by only one thread at a time. They have to take following proceedings to have access to a data buffer. First, they ask permission of the buffer manager to have access to one of the data buffers, and wait for the permission. With the reply from the buffer manager, they have access to one of the data buffers. They have to inform the buffer manager as soon as they complete the access, to enable other threads to have access the data buffer.

Each data buffer has a flag, “nFlag”, to express whether this data buffer is rewritten by the collector (nFlag= 1), or is already recorded on a hard disk by the recorder (nFlag= 0). A data buffer with a number “nTop0” is the last one which the collector has rewritten, while a data buffer with a number “nTop1” is the next one which the recorder is to record on a hard disk.

When the collector thread requires to have access to a data buffer pointer, the buffer manager checks the following conditions, 1) the flag nFlag of the data buffer with nTop0 is 0, 2) the difference between nTop0 and nTop1 is less than nine. The buffer manager allows the collector to have access to the data buffer pointer with nTop0 only if these conditions are satisfied. If they are not satisfied, this request is queued.

When the recorder thread requests to have access to a data buffer pointer, the buffer manager allows it to have access to a data buffer whenever there is a data buffer with nFlag= 1. This confirms that the recorder thread has a top-priority. If there is no data buffer with nFlag=1, this request is queued.

When the server threads request to have access to a data buffer pointer, the buffer



manager allows them to have access to it only if the following conditions are satisfied, 1) the data buffer with  $(nTop0 - 1)$  has not yet sent to the server thread, 2) the difference between  $nTop0$  and  $nTop1$  is less than three. Otherwise, this request is queued. As a result, the server thread always receives the newest data buffer, but has less priority.

When these threads return the data buffer pointer, the buffer manager increments  $nTop0$ ,  $nTop1$ , and  $nFlag$ 's, and treats queued requests.

Communications between the buffer manager thread and other threads are performed using "Event" without unnecessary CPU workload.

#### 2.2.4 Recorder

The recorder thread is created when a user starts RUN. This thread records all the data buffers, taken by the collector thread, on a hard disk. It takes about 3 ms to record 16 KB of data buffer on a hard disk. The buffer manager hands data buffer pointers to the recorder thread with a top-priority, as described above.

#### 2.2.5 Router and Server

The router thread is created when the user application is invoked. This thread creates a server thread, when the Back-End computer requests to connect. Up to three Back-End computers can connect to the Front-End computer.

The server thread receives a data buffer pointer from the buffer manager thread, and sends 16 KB of data buffer to Back-End computers, for the online data analysis. The data buffer is transferred in a TCP/IP protocol, by using a C-socket programming technic, which is supported in any OS, like as UNIX (Linux), OpenVMS, and so on.

### §3. Performance test

The performance of the DAQ system, "NewKoala", was investigated in two steps. The first one is to investigate the device driver performance itself, namely a real-time response. The second one is to investigate the overall performance with the GUI and other threads running.

Table 2. Results of the measurement of the real-time response for the Kinetic 2927 device driver.

Interrupt latency	$\approx 15 \mu s$	
	without ISR	with ISR
16-bit Programmed I/O	$30 \mu s / 16\text{-bits}$	$43 \mu s / 16\text{-bits}$
24-bit Programmed I/O	$32 \mu s / 24\text{-bits}$	$47 \mu s / 24\text{-bits}$
16-bit DMA transfer	—	$3 \mu s / 16\text{-bits}$

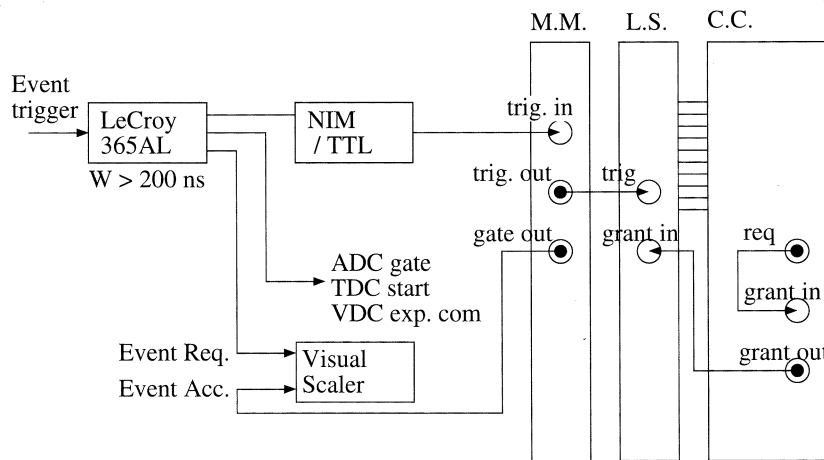


Fig. 6. Trigger circuit used to measure a live time of the DAQ system, “NewKoala”.

### 3.1 Real-time response of the Kinetic 2927 device driver

A real-time response of the Kinetic 2927 device driver was investigated using a simple single-thread program, where a 16-bit PIO, for example, was repeated 10 thousand times without waiting for RFS interrupts nor Q-responses, and the interval time was measured in the program. For the 16-bit DMA data transfer, a data transfer of 1 KB data was repeated in the test program. Table 2 lists the results for the 16-bit PIO, the 24-bit PIO and the 16-bit DMA data transfer.

All the data transfer include the DONE interrupt latency from the Kinetic 2927. To investigate the interrupt latency itself, two tests were performed for device drivers with and without the ISR were prepared.

Table 3. Results of the performance test for “NewKoala”. The item, “Trigger”, indicates the interval time among event triggers.

Trigger	Data [/sec]	Live Time		
		Recorder	no Scaler	with Scaler
400 $\mu$ sec	300KB	without	99.9%	98.4%
		with	97.1%	96.0%
300 $\mu$ sec	410KB	without	99.9%	97.7%
		with	93.6%	93.4%
280 $\mu$ sec	440KB	without	96.2%	85.8%
		with	84.3%	74.9%

### 3.2 Overall performance of the “New Koala”

The overall performance of the DAQ system was investigated by measuring the live time during the data acquisition with several trigger rates. Event size in this measurement was 63 words, including 6 words of the event header. The collector thread read the L.S. FIFO memory with the RFS interrupt from the Kinetic 2927. Some of the data buffers were transferred from the server thread to one Back-End computer, where any data analysis was not performed. An online analyzer program QPAW<sup>4)</sup> was used on OpenVMS system (DEC3000 model 600 AXP/OpenVMS Ver. 6.1). Less than four data buffers were transferred at any event rate, which is due to the transfer speed of the Ethernet. The router thread did not affect the live time, and this effect was confirmed to be less than 0.3%.

Effects of recording data buffers on the live time were measured with and without the recorder thread invoked. Since the collector thread reads scaler’s data block by block, reading scaler’s would affect the live time. This effect was also measured by reading and not reading 24 channels of scaler’s.

Figure 6 shows a trigger circuit, used in the measurement. A pulse generator with rates from 1 KHz to 10 KHz is used to generate an event trigger. The event trigger is delayed by 200  $\mu$ sec, which corresponds to the conversion time of CAMAC modules, and is introduced into the L.S. through a Marker Module (M.M.). The M.M. intercepts the next event trigger before the L.S., while the L.S. reads data of CAMAC modules with the previous event trigger. An output signal from “gate-out” of the M.M. is the same as that from “trig-out” output. The live time was measured by counting request and accept counts

with a visual scaler. It should be noticed here that the live time, measured in this way, is reduced by reading scalers, block by block.

Table 3 lists results of the measurement. When the recorder thread is not invoked and the collector does not read scaler's data, up to 410 KB/sec of data can be taken without any dead time. The effect of reading scaler's depends on the event rate, and is less than 3 % up to 410 KB/sec. It increases rapidly, however, up to 15% at 440 KB/sec. At the same time, the effect of the recorder thread increases at 440 KB/sec. These are because the L.S. FIFO data memory becomes full and the L.S. ceases list sequencing, during the collector thread changes a data buffer format and hands data buffers to the buffer manager. Some improvement, therefore, may be necessary in the collector thread.

#### **§4. Conclusion**

We have developed a new DAQ system, where the Windows NT™ is used for the OS of a DAQ computer. This DAQ system showed enough performance in the data acquisition with standard CAMAC modules, and up to 410 KB/sec data can be taken without any dead time. Some revision is necessary in the collector thread routine, however, to take more than  $\approx$ 410 KB/sec data.

For the future, an online data analyzer system can be constructed also on the Windows NT using PAW, since the CERN Library is formally supported.

#### **References**

- 1) M. Nomachi, *et al.*, "UNIDAQ" LBL-35822 (1994) p. 114.
- 2) Y. Yasu, M. Nomachi, Y. Nagasaka, R. Ball, Y. Tajima and C. Timmermans : IEEE Trans. Nucl. Sci. **43** (1996) 9.
- 3) A. Tamii, H. Sakaguchi, H. Takeda, M. Yosoi, H. Akimune, M. Fujiwara, H. Ogata, M. Tanaka and H. Togawa : IEEE Trans. Nucl. Sci. **43** (1996) 2488.
- 4) M. Kawabata and K. Tamura : RCNP Annual Report (1994) p.170.



## IV. 加 速 器 稼 働 状 況

## 平成9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

### 概 況

今期はSTBリング建設の3年目で、第一実験室RI照射の共同利用を前年度と同様に行った。ライナック故障によるマシンタイム補償は原則的に行わない方針でのぞんだ。

前期はマシンタイムを月1回のRI照射運転で17シフトを採択した。実験に先立ちライナックの総合運転を行い万全を期した。通常の利用と同じ保守管理を行うので、人員と予算はそれなりに必要である。後期のマシンタイムはRI照射に17シフトを採択し、実施した。その他にⅡ系およびⅢ系STBリングの調整運転に電子ビームを供給した。これまで通りライナックは安定した運転と故障発生軽減のためクライストロン室温度を25℃以下で行う従来の方式を継承している。

ライナックの性能は第一実験室でエネルギー65.25MeV、平均ビーム電流90 $\mu$ Aである。第二実験室へのビーム加速は第二実験室STBリングと新Ⅱ、Ⅲ系の分析系の整備が終わった9月から第二電磁石室の使用を開始し、最大エネルギー218MeVである。ビーム電流は190MeVで加速管列最後の電流モニターCM7の換算値でピーク値70mA、ビーム偏向室では平均電流1 $\mu$ A以下であった。当施設は放射線使用施設で定期の施設検査年に当たっており、これを受けた。また、STBリングの完成に伴い性能の確認の試運転と変更申請の検査を受けるための準備を進めている。

### マシンタイム実施状況

前年度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。実験は照射後の測定を考え日祭日の前と翌日に設定した。実験スケジュールは放射線安全管理のインターロック点検、各系の試運転、不具合箇所の修理と調整、総合試運転、および実験とした。総合運転では長い停止後のライナック加速管への最初のRF入力時にガスが放出し真空を悪化させる。特にクライストロンパルサー1号機のRF入力時にガス放出が多くガス出しをして、真空が回復した後に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。実験当日もRF



入力時にガス放出があり、クライストロンパルサーを1台ごとにタイミングを調整し、ガス放出量が収まってから全出力を加速管に入力する。電子ビームはRFドライバーの調整で非常に安定性が向上し、常時、安定したRI照射ができる。

Ⅱ・Ⅲ系でSTBリングのストレッチャーとブースターモードでの電子ビーム入射での試運転を続けている。両モードでの電子ビームの入射安定性とパルス間にいろいろな問題が浮かび上がったが、対応しながら試運転を続けている。

第1表にマシンタイム実施状況を示す。

第1表 平成9年度 タイムマシン実施状況。

課 題	採 択	実 施	未 消 化	合 計
前期R I 実験	17	14	3	17
前期R I 実験	17	17		17
課題シフト数	43	31	3	34

## 保守状況

組み替え工事をしたⅡ系分析系とⅢ系分析系の各種電磁石への配線接続と電流テストを行った。ECSマグネットのコイルへの接続端子類を真鍮製に換え接触不良になる錆の原因を取り除いた。

真空系は本体室加速管列A部イオンポンプ4台を交換した。加速管列B部の上流は真空度が通常より悪くリークテストを行ったがディテクタの感度が悪く、リーク箇所を発見できなかった。リークディテクタの更新が必要である。また、加速管列A部ではガス放出が多く、真空の質を調べるため準備を進めている。

制御系は第1実験室のプログラマブルコントローラ（PLC）が故障のため一時使用できなくなった。同型PLCは補充できないので新機種に更新する。また、ライナック制御系によるライナック運転の一括設定と運転記録の印刷の正常化に協力をお願いしている。

ガングリッドパルサー（半導体）はノイズによるエミッション波形への影響がたまに見られた。これは出力回路のシールド強化が必要である。誤動作は変換増幅器を遮蔽シールドで防ぐ予定である。電子銃はウエネルト電極からのエミッション発生でグリッド制御が不安定な状態が観測されたので交換を予定している。現在はグリッドパルス伝送路に帰還回路とバイアス回路を附加し抑制している。

空気源はコンプレッサー交換後トラブルが続き交互運転のシーケンスを外した状態で運転している。空気系の自動ドレインや圧力調整器の性能低下があり、これらの交換を予定している。運転状態を把握するため圧力センサーをリザーバタンク出力に設置した。これをモニターの自動記録へのつなぎ込みを予定している。

冷却系は今後 STB リングに純水を供給することになった。最初に STB リング冷却系に純水を供給し、純水製造器の再生を繰り返し純水の供給を終えた。新しくクライストロン室に設置した STB リング冷却系用純水貯蔵タンクに給水シーケンスを組み自動補給の方式に整備した。この自動補給方式では補給回数を自動記録するよう記録計と接続した。加速管 A 1 フォーカスコイルの絶縁用ゴムパイプより水漏れがあり、水漏れ箇所を交換した。

モニター関係では B 部加速管最後の電流モニターを接続した。分析マグネット M 6 の前には電流モニターと増設したビームスクリーンモニターがあり、ビーム電流とプロファイルの観測を可能にした。加速間列 A 部のビームロスモニター検出器が不良で、ビームロスが少ない個所の検出器を流用している。また、透過波モニターの切り替え器の 1 部更新を準備している。

クライストロンパルサー 3 号機と 5 号機の Deqing 回路を動作するよう整備した。また、3 号機の Deqing はサイラトロン放電開始のノイズと基準電圧にリップルが乗っており本来の性能が充分でない。パルサー筐体内の配線経路の変更と基板内のリップル軽減を予定している。現在、クライストロンパルサーとガンパルサー全てで Deqing 回路は動作している。

RF 関係は STB リングへのビーム入射を安定にするため RF ドライバーのパルス波形の調整とパルスとパルス間の不均一を改善した。パルス平坦度の改善とパルスとパルス間の改善にもっと力を注げば現在よりも多少性能はアップする。現在 RF 信号発生器のシンセサイザー化の準備を進めている。

立体回路系加圧系の導波管は膨らみや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 ベンドと直線導波管、および 3 dB 結合器の交換を行った。また本体室真空導波管冷却管接続部からの水漏れは 3 度接着剤による補修を試みたが、いずれも完全に水漏れを止められない状況である。この修理は真空系を大気圧に晒すことになり、真空導波管の使用年数と加速管列の真空を考慮すれば冷却管ロウ付け部分の改修ではなく更新した方がトラブルが少ないと思われる。現状では加圧系に膨らみで変形した導波管がまだあるので、これを更新する。今後は透過波検出の方向性結合器や真空導波管、および電送経路の損失低減を目標にし、短期間で例えば 2 年間ぐらいで整備する。また、加圧系と真空系ダミーロードの更新も一緒にと考えている。



本体室の全クィックバルブは動作が確実な信頼性のあるものを選択の基準にし、動作時間は通常の早さを選んだ。さらに停電時にエア源が消滅した場合でも閉でロックするゲートバルブを購入し、取付準備を進めている。ゲートバルブのシーケンスはPLCを使用する予定である。

ライナック運転はSTBリングに入射の試運転が多いが、準通常運転なので電子銃、サイラトロンおよびクライストロンの購入を予定している。設備では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七シーズン過ぎたが未だ修理はされていない。安全のためクライストロン室屋上の雪かきを3回おこなったが、安全性や故障の点から、今後は運転中止も考える。

冷却系に限らず、クライストロン室温度やマシン関係のアラームでライナックを停止し、故障の拡大を防ぐようこれからも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可能であるが、実験停止と空調の停止は所内の実験責任者をお願いしている。

なお、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するようになっていきます。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。

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(1997年1月~12月)の題目を収録しました。

## I 原子核物理

1. Angular Correlations for the  $^{12}\text{C}(e, e' n)^{11}\text{C}$  Reaction in the Giant Resonance Region.

T. Saito, S. Suzuki, K. Takahisa, C. Takakuwa, M. Oikawa, T. Tohei,  
T. Nakagawa and K. Abe : Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1018.

2. Bremsstrahlung in Alpha-Decay of  $^{210}\text{Po}$ : Do  $\alpha$  Particles Emit Photons in Tunneling ?.

J. Kasagi, H. Yamazaki, N. Kasajima, T. Ohtsuki and H. Yuki : Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 371.

3. Bremsstrahlung Emission in Alpha-Decay and Tunneling Motion of Alpha-Particles.

J. Kasagi, H. Yamazaki, N. Kasajima, T. Ohtsuki and H. Yuki : J. Phys. G. **23** (1997) 1451.

## II 放射化学

1. Impurity Diffusion of Scandium in Aluminum.

S.- I. Fujikawa : Defect and Diffusion Forum **143-147** (1997) 113.

2. Tracer Diffusion of Magnesium in Pseudo-Binary Al-Mg<sub>2</sub>Si Alloys.

S.- I. Fujikawa : Defect and Diffusion Forum **143-147** (1997) 403.

3. Interdiffusion between Aluminum and Al-Mg Alloys.

S.- I. Fujikawa and Y. Takada : Defect and Diffusion Forum **143-147** (1997) 409.

4. Thermomigration of Zinc in Aluminum and Al-Zn Alloy.

S.- I. Fujikawa, Y. Minamimura and T. Morikawa : Defect and Diffusion Forum **143-147** (1997) 1693.



5. Selective Transport of Yttrium (III) in the Presence of Iron (III) through Liquid-Membrane Impregnating Acidic Organophosphonate Mobile Carrier.  
K. Akiba, M. Iton and S. Nakamura : J. Membrane Sci. **129** (1997) 9.
6. Molecular Rocket and Implantation Reactions : Shock-Induced Phenomena at Atomic and Molecular Levels.  
K. Yoshihara and T. Sekine : Radiochim. Acta **77** (1997) 63.
7. The Attacking Probability : A Factor Governing Replacement Reaction of Ruthenium Recoil Atoms in Solid Ruthenocene Derivative Complexes.  
I. Yamaguchi, T. Sekine and H. Kudo: Radiochim. Acta **77** (1997) 69.
8. Photon and Proton Activation Analysis of Iron and Steel Standards using the Internal Standard Method Coupled with the Standard Addition Method.  
K. Masumoto, M. Hara, D. Hasegawa, E. Iino and M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. **217** (1997) 247.
9. Determination of Fluorine in Standard Rocks by Photon Activation Analysis.  
H. Sakurai, M. Fukuda, Y. Hayashibe, Y. Sayama, K. Masumoto and T. Ohtski : J. Radioanal. Nucl. Chem. **217** (1997) 267.
10. Detection and Separation of Radioactive Fullerene Families by Radiochemical Techniques.  
T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki, K. Kikuchi, K. Ohno, Y. Maruyama and Y. Kawazoe : AIP Press, **CP416** (1997) 261.
11. Drift Tube Measurements on Na<sup>+</sup> Ions and Clusters using the <sup>24m</sup>Na Tracer.  
A. Kasuya, B. Abmayr, T. Ohtsuki, K. Masumoto, H. Kodajima, E. Huenges and H. Morinaga : AIP Press, **CP416** (1997) 270.

### Ⅲ 加速器・測定器

1. Resonance Effects of Transition Radiation Emitted from Thin Foil Stacks using Electron Beam.

T. Awata, K. Yajima, T. Tanaka, M. Imai, A. Itoh, N. Imanishi,  
M. Oyamada, S. Urasawa, T. Nakazato, K. Yoshida, K. Nakayama and  
A. P. Potylitsin : Radiat. Phys. Chem. **50** (1997) 207.

編 集 委 員

齋 藤 悌二郎 (委員長)      寺 沢 辰 生  
小山田 正 幸                      大 槻       勤

核 理 研 研 究 報 告   第31卷   第 1 号

1998年 9 月 発 行

発行所 東北大学大学院理学研究科  
          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982-0826)  
          電話 022-743-3400

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 022 (263) 1166 (代)

RESEARCH REPORT OF  
LABORATORY OF NUCLEAR SCIENCE  
TOHOKU UNIVERSITY

Volume 31 Number 1 September 1998

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