

## 原研・高崎研の加速器整備計画と核データ

(原 研) 田 中 進

### 1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では、放射線照射利用研究の新たな展開を図るため、表1に示す研究を行うイオンビームを用いた放射線高度利用研究計画を推進しており、これに必要なイオン照射研究施設を1992年度までに整備する計画である<sup>1)</sup>。

放射線高度利用研究計画を進めるためには、多くのイオン種と幅広い加速エネルギーが必要であり、このためK値110のAVFサイクロトロン加速器、3MVタンデム加速器、3MVシングルエンド加速器及び400kVイオン注入装置の合計4基の加速器を備える。表2に各加速器の代表的なイオン種に対する加速エネルギー範囲と最大電流を示す。また、4基の加速器を設置する実験建家として、サイクロトロンを設置してイオンビームを利用するためのサイクロトロン棟、3基の加速器を設置し各加速器からのイオンビームを単独若しくは複合して利用するための複合ビーム棟、施設の運転管理、ホット実験等を行うイオンビーム研究棟の合計3棟の建家が設けられる。建家の1階平面図を図1に示す。1990年度までの1期計画ではサイクロトロンと3MVタンデム加速器、2期計画で3MVシングルエンド加速器と400kVイオン注入装置の施設を完成させる。

以上のようにイオン照射研究施設は、加速器4基、加速器本体室と照射室の合計16室を備え、数十keVから数百MeVまでのイオンビームを利用できる世界的にも例を見ない施設となる。

ここでは、この施設の遮蔽設計と運用管理上重要なRI管理のための放射化量計算コードシステムを概説し、このエネルギー領域における加速器施設遮蔽設計の現状の一端を明らかにすると共に必要な核データと問題点を述べる。

### 2. 遮蔽設計

加速器施設の遮蔽設計項目の概要を表3に示す。設計は、先ず放射線発生源の条件を求め、遮蔽設計の対象となる2次放射線を決定し、コンクリート等の1次遮蔽体の設計、漏洩放射線量等の評価を行う。また、生成RI及び放射能の推定を行い、施設の給排気設備及びRI使用・貯蔵設備の設計を行う。

遮蔽設計で施設の構造を決定する最も重要な項目は、設計の基本データとなる2次放射線の推定と、1次遮蔽体の構造と厚さを決定する透過・散乱の基礎データである。

#### 2.1 サイクロトロン棟の放射線源の推定

サイクロトロン棟では大電流の軽イオンビームを幅広いエネルギー範囲で利用するものから、小電流の重イオンビームを利用する研究が計画されている。したがって、放射線源は高エネルギーの中性子を発生し1次遮蔽体の対象放射線源となる陽子、中性子発生量が多い重陽子の評価と共に、重イオン室設計のための重イオンによる2次放射線の推定を行った。2次放射線の発生は、イオン

種とターゲットによって異なることから、ターゲットはイオンビームの加速と輸送途中のビーム損失箇所の加速器構造材及び実験用試料（ターゲット）を想定する必要がある。当施設では核燃料物質を取り扱わないことを前提としていることから、ターゲットの材質としてCuを想定し、中性子を大量に発生するBeターゲット等を用いる場合は局所遮蔽で対応することにした。遮蔽設計の対象となる2次放射線は中性子、ガンマ線及びX線であり、1次遮蔽体、迷路内のストリーミング、スカイシャイン、空気の放射化等の評価をするため、全発生量と角度依存のエネルギースペクトルが必要である。しかし、中村<sup>2)</sup>が報告しているように、このエネルギー範囲の2次放射線を推定するためのデータは少なく、これまでに報告されている文献、可能な計算手法を用いて、次のように放射線源の推定をした。

#### (1) 中性子の全発生量

中村<sup>3)</sup>がまとめたイオンと厚いターゲットの各種組合せによる全中性子発生量のデータを用いて全エネルギー範囲の発生量を推定した。

#### (2) 中性子の角度依存エネルギースペクトル

陽子については入射エネルギーを90MeVとし、NMTC/JAERI<sup>4)</sup>及びHETC<sup>5)</sup>コードを用いてCu及びAlについて計算し、Cuのエネルギースペクトルを全中性子発生量及び実験データを基に角度分布の補正を行った。

重陽子については入射エネルギーを60MeVとし、Goebelら<sup>6)</sup>の厚いBeターゲットからのエネルギースペクトル推定値をそのまま採用した。

重イオンについては、Drouetら<sup>7)</sup>が推定したエネルギー500MeVのCイオンが厚いFeターゲット入射した場合の発生中性子エネルギースペクトルに補正係数を乗じて用いることとした。

#### (3) ガンマ線の全発生量とエネルギースペクトル

Shinら<sup>8)</sup>の実験値を基に、全発生量については中性子発生量と同量とし、エネルギーは15MeVを最大とした $1/E$ に比例するスペクトルとした。

### 2. 2 複合ビーム棟の放射線源の推定

複合ビーム棟では、軽イオンビームのエネルギー範囲が25keV～6MeVとなり、中性子発生を目的としない重陽子ビームの利用やLiをターゲットとした研究が計画されている。また、3MVシングルエンド加速器は、高電圧極性を反転する機能を有しイオンの他に電子の加速も行う。しかし、大部分の研究は、2次放射線発生量の少ないイオンビームとターゲットの組合せで行われ、特に400kVイオン注入装置ではビーム使用中に人が立ち入りながら実験を行う特定照射室設けられる。したがって、放射線源の推定には、3基の加速器の加速エネルギー範囲におけるイオンとターゲットの各種組合せによって発生する2次放射線のデータが必要である。このエネルギー範囲では、中性子源として加速器を用いるための重陽子や陽子ビームの中性子発生量のデータ、陽子ビームを用いた核構造や材料の解析に用いるための陽子捕獲反応のデータがあるものの、中性子発生

量の少ないイオンとターゲットの組合せのデータが極めて少ない。3基の加速器についてこれまでに報告されている文献を用いて、次のように放射線源の推定をした。

(1) 中性子の全発生量

Burri<sup>13)</sup>がまとめた低エネルギー加速器遮蔽用データ及び実験データ<sup>10)-14)</sup>を用いて、陽子、重陽子、He粒子による各種ターゲットからの全発生量を推定した。2次放射線の発生量が少ない重イオンとターゲットの組合せについては、核反応のQ値<sup>15)</sup>及びクーロン障壁の高さ(エネルギー)等のデータからHe粒子と同等以下と推定した。

(2) 中性子の角度分布とエネルギースペクトル

中性子のエネルギースペクトルは、吸熱反応では単色で入射イオンビームエネルギーに等しいとし、発熱反応では入射イオンビームと反応のQ値の合計エネルギーを最大エネルギーとした平坦な連続スペクトルとした。角度分布は、等方分布とした。

(3) ガンマ線の全発生量とエネルギースペクトル

Shin<sup>8)</sup>の実験値を基に、全発生量については中性子発生量と同量とし、エネルギーは15 MeVを最大とした $1/E$ に比例するスペクトルとした。

(4) X線の発生量

主として電子線加速器の遮蔽設計方法及びデータをまとめた報告<sup>16)、17)</sup>を用いた。

## 2.3 透過・散乱基礎データ

高エネルギー中性子の遮蔽体透過については、単色中性子の透過線量<sup>18)</sup>や $1/10$ 価層<sup>16)、17)</sup>、高エネルギー陽子をターゲット入射させ発生した中性子の透過線量を求めるデータ<sup>19)、20)</sup>が報告されている。1次遮蔽体にはコンクリートの他に遮蔽扉等の局所的な遮蔽にコンクリート、鉄、砂鉄、ポリエチレン等の多重層遮蔽体がいられる。中性子について前述の $1/10$ 価層等から多重層の透過線量を求めることは難しいこと、データに一貫性をもたせること等から、ANISNコードとDLC87/HILOの群定数<sup>21)</sup>を用い、エネルギー1~200 MeVの中性子に対する半無限平板コンクリート及び鉄中の透過線量を求めた。また、遮蔽計算を簡略化するために透過線量のデータを基に $1/10$ 価層のデータを作成した。

当施設の大きな照射室では実験者の出入りを容易にするため迷路を設けている。迷路内の散乱中性子線量は、Tesch<sup>22)</sup>が実験値を基にした経験式を報告しており、中性子のアルベドは3 MeV以上で減少する傾向にある<sup>16)</sup>ことなどからこれまでのデータを基に推定可能である。しかし、迷路構造を形成するコンクリート及び迷路入口に設けられる遮蔽扉の厚さは、散乱中性子のエネルギースペクトルがわからないと合理的な遮蔽設計ができない。このため、DOT3.5コードとHILO群定数を用い、エネルギー1~150 MeVの中性子のコンクリートに対するカレントアルベドを計算し、線量アルベドを求めた。

なお、計算に用いたDLC87/HILO群定数は、中村<sup>2)</sup>が指摘するように実験値との比較が十分でないこと、透過・散乱に関する実験データが極めて少ないこと等から前述計算値の評価が

できない現状である。

### 3. 放射化量計算コードシステムの概要

放射線高度利用研究では、研究分野に応じて使用される加速器、周辺機器及びターゲット等が多岐にわたり、また、軽イオン、重イオン中性子などの放射線が広範囲のエネルギーで使用される。このため加速器構成機器、周辺機器及びターゲット等で生成する放射性核種とその放射能が多種多様となり、実験者の被曝管理及び廃棄物管理等の評価が複雑なものとなる。これらの評価を実験者自身が行えるようなシステム作りを目的として開発しているのが、放射化量計算コード（IRAC：Introduced Radioactivity Analysis Code）システムである。

IRACコードシステムの概要を表4に、計算の流れを図2に示す。取扱可能な入射粒子はイオンと中性子であるが、中性子についてはターゲット中のエネルギー等の減衰を考慮していない。当システムの重要なデータライブラリーとして、放射化断面積と崩壊データがあげられる。

イオン及び高エネルギー中性子の放射化断面積については、現在国内外でその整備が開始されている段階であり、必要なターゲット核種とエネルギー範囲のデータが得られるまでには時間がかかり、当システムの使用までには間に合わない。このため、計算の入力データが簡単で、断面積の大きい核反応について計算値がファクター3程度の誤差範囲と想定されるALICEコード<sup>23)</sup>を用いて断面積ライブラリーを作成した。放射化断面積は、入射粒子を中性子及び軽イオンとした場合で1～100MeV、重イオンで2～400MeVのエネルギー範囲とし、C～Pbまでの代表的な約40種のターゲット核種について計算し、ライブラリー化した。

崩壊データとしては半減期、崩壊割合及びエネルギー群別ガンマ線放出数等のデータが必要であり、当施設で対象となる広範囲の放射性核種についてまとめられたライブラリーはない。このため、ENSDFライブラリーを編集し、約2600核種のデータを対象とした崩壊データライブラリーを作成し、各データをチェック中である。

### 4. おわりに

冒頭で述べたように、当施設は数十keVから数百MeVまでのイオンビームが利用できる施設であり、施設の遮蔽設計を始めとし運転管理に広範囲の核データが必要である。しかし、このエネルギー領域の系統的にまとめられた核データは極めて少ない現状であり、早急に整備されることが望まれる。

なお、現在当施設を用いた核データや遮蔽データの系統的な測定実験が計画されており、遮蔽設計に必要な核データ等の実験データ蓄積及び遮蔽設計計算手法の確立が進められる予定である。

当施設の全体設計、遮蔽設計及びIRACコードシステムの開発にあたり、施設設計の問題、各種データや計算コードについて多くの方々に御教授いただいた。誌面を借りて関係者に謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) M. Maruyama: Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research, (1990), Ibaraki, Jan. 24-26 1990
- 2) 中村尚司: 核データニュース 35, 1(1990)
- 3) 中村尚司: 原子核研究、29(6)
- 4) 中原康明、筒井恒夫: JAERI-M 82-198(1982)
- 5) RSIC Code Package CCC-178/HETC
- 6) K. Goebel and A. J. Miller: Nucl. Inst. Methods 96, 581(1971)
- 7) J. Drouet and A. Leleux: D.CEN-S/SPR/SR1/78-342(1978)
- 8) K. Shin et al.: Phys. Rev. 29C, 1307(1984)
- 9) E. A. Burrill: "Neutron Production and Protection", High Voltage Engineering Corporation(1987)
- 10) C.G. Clayton and R. Spackman: Int. J. Appl. Radiat. Isot. 36, 13(1985)
- 11) R.G. Jaeger ed. in chief: "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol. 3, 152-174(1970), Springer-Verlag
- 12) J.K. Bair et al.: Int. J. Appl. Radiat. Isot. 32, 389(1981)
- 13) J.K. Bair and J.G. del Campo: Nucl. Sci. Eng. 71, 18(1979)
- 14) F.H. Attix and E. Touchilin ed.: "Radiation Dosimetry", Vol. 3, 287-308(1969), Academic Press
- 15) K.H. Hellwege ed. in chief: "Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series", Vol. 5 Part a(1973), Springer-Verlag
- 16) NCRP Report No. 51(1977)
- 17) IAEA Technical Reports Series No. 188(1979)
- 18) A.B. Chilton, J.K. Shultis and R.E. Faw: "Principles of Radiation Shielding", 254(1984), Prentice-Hall, Inc.
- 19) H.W. Patterson and R.H. Thomas: "Accelerator Health Physics", (1973), Academic Press
- 20) T.H. Braid et al.: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18, 821(1971)
- 21) R.G. Alsmiller, Jr. and J. Barish: ORNL/TM-7818(1981)
- 22) K. Tesch: Particle Accelerators 12, 169(1982)
- 23) M. Blann: DE87 007443(1987)
- 24) K. Hata and H. Baba: JAERI-M 88-184(1988)

表1 放射線高度利用研究の概要

耐放射線性極限材料の研究

1. 宇宙環境材料の研究開発

半導体素子・センサーの耐宇宙放射線性の研究、宇宙用構造材料の耐宇宙環境性の研究

2. 核融合炉材料の研究開発

トリプルビーム照射による第1壁材料等の損傷の研究、有機複合材料に関する研究

バイオ技術の研究

環境耐性遺伝子資源の研究、生体物質のイオン放射線化学の研究、

バイオニクス材料の研究、新標識化合物の合成技術の研究

新機能材料の研究

新物質創製・改質および新機能発現機構の研究、新分析技術の研究

関連基盤研究

イオンビーム工学、高度イオンビーム計測

表2 加速器の主要性能

加速器名	性 能			その他の 加速粒子
	加速粒子	加速エネルギー	最大電流	
AVF サイクロトロン	陽子	5 ~ 90 MeV	30 μA	He C N O Ne
	重陽子	5 ~ 55	30	
	Ar	100 ~ 700	5	
	Kr	200 ~ 630	1	
	Xe	310 ~ 620	0.1	
3MV タンデム加速器	陽子	0.8 ~ 6	5	He Li B C F N S i
	C	0.8 ~ 1.5	5	
	Ni	0.8 ~ 1.5	5	
	Au	0.8 ~ 9	10	
3MV シングルエンド 加速器	陽子	0.4 ~ 3	300	
	重陽子	0.4 ~ 3	150	
	He	0.4 ~ 3	300	
	電子	0.4 ~ 3	100	
400kV イオン注入装置	He	25 ~ 400 keV	50	陽子 重陽子
	Ni	25 ~ 400	30	
	Au	25 ~ 400	30	

表3 遮蔽設計の概要

項 目	検 討 要 素
放射線発生源の条件確定	加速器性能（イオン種、エネルギー、電流） ビーム輸送系（ビーム損失箇所、損失率、ターゲット） 実験条件（ターゲット、局所遮蔽、ビームダンプ）
2次放射線の推定	対象放射線（中性子、ガンマ線、X線） 放射線データ（全発生量、エネルギースペクトル）
1次遮蔽体の設計	遮蔽体材質（コンクリート、鉄、多重層） 遮蔽基礎データ（1/10価層、アルベド）
2次放射線の線量評価	評価対象（1次遮蔽体、迷路、ダクト、局所遮蔽体） 評価項目（透過線、ストリーミング、スカイシャイン、 被曝線量）
放射化（残留放射能） の評価	評価項目（生成R I、放射能及びその濃度、 被曝線量）

表4 I R A Cコードシステムの概要

項 目	内 容
入射粒子	荷電粒子（軽イオン、重イオン） 中性子（単色、連続エネルギースペクトル）
モジュール	放射化断面積編集、エネルギー損失・飛程計算*、 放射化・崩壊量計算、線量計算
データライブラリー	放射化断面積（A L I C E 8 5 による計算データ、 実験データ*、熱中性子捕獲） 核質量データ（O S C A Rコードライブラリー） 崩壊データ（E N S D Fデータ編集） ガンマ線（E N S D Fデータ編集）

\*：O S C A Rコード<sup>24)</sup> を引用している。

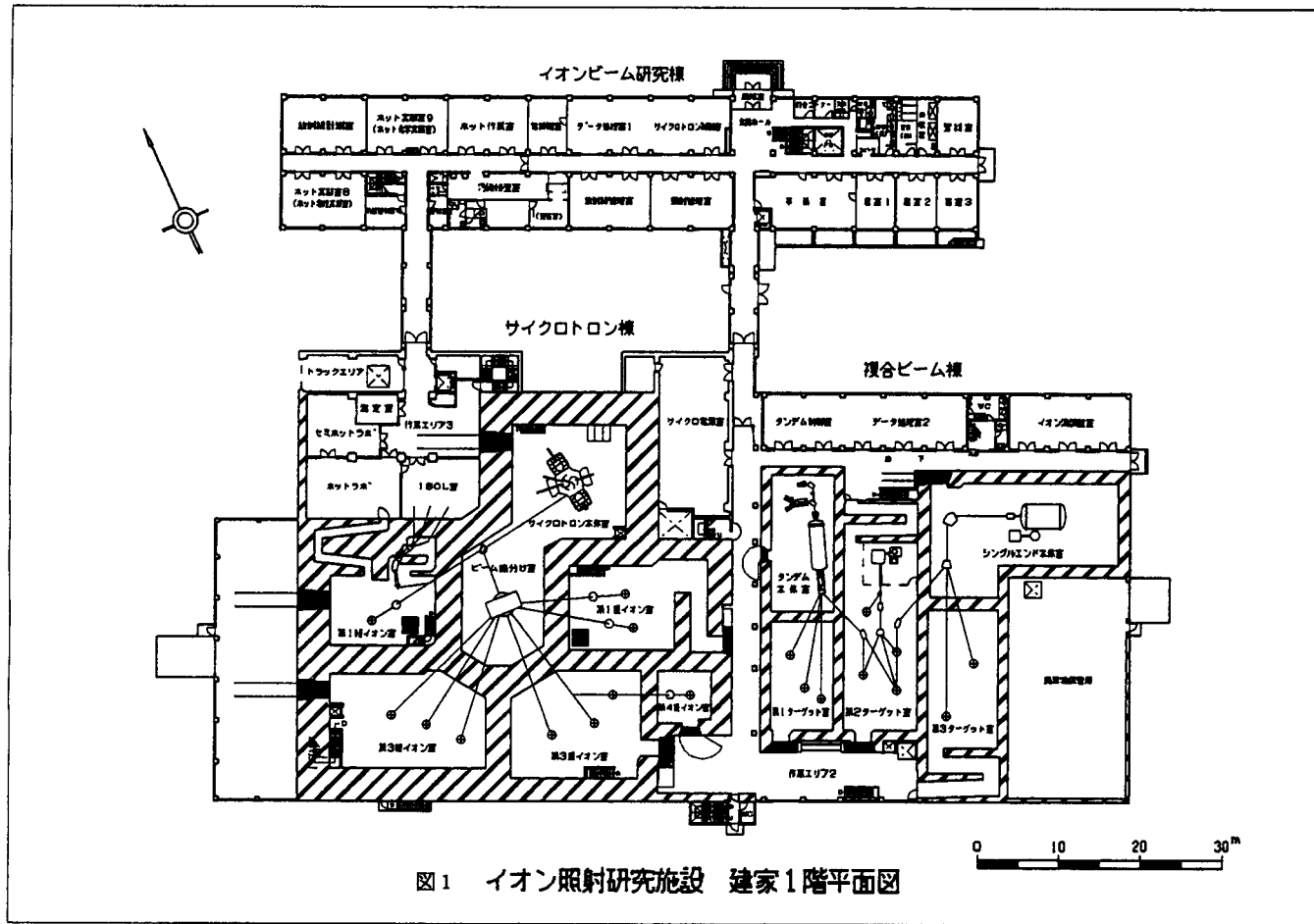


図1 イオン照射研究施設 建家1階平面図



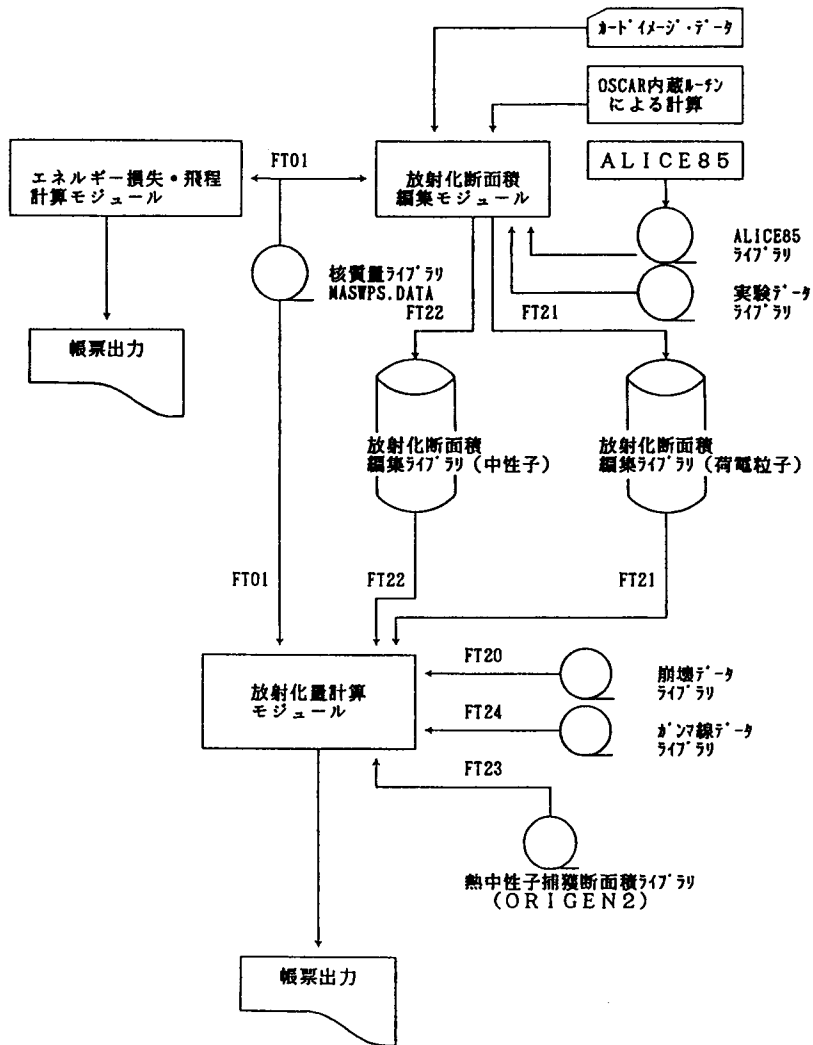


図2 IRACコードシステムの放射化量計算フローダイアグラム