加速器の開発と工学的応用研究の現状

「加速器の新しい工学的応用」研究専門委員会*

(1987年 11月16日 受理)

Review of Development of Accelerator Technology and Its Engineering Applications

By Research Committee on Applications of
Accelerators to Nuclear Engineering Problems

The status quo of the development of proton and electron accelerators and future plans on proposal are reviewed from the viewpoint of their applications to engineering problems. Their promising applications are discussed with the emphasis on utilizations of the nuclear spallation reaction caused by a high intensity beam. Topics included are: (1) fissile breeding with spallation neutrons (2) TRU, transmutation with high energy protons and neutrons, and (3) intense spallation neutron sources for basic and material science researches,

KEYWORDS: *proton accelerator, electron accelerator, spallation, fissile material, breeding, TRU, transmutation, spallation products, neutron sources, safety, shielding, reviews, research programs, fission products*

I. ま え が き

X線発生装置に象徴されるように、加速器は誕生の始めから医療、産業の進歩に必要な道具と、原子、原子核さらに素粒子など20世紀の基礎科学研究手段との二面性を持っていた。1950年代までに加速器を使用して得られた原子核の構造の理解が核分裂エネルギーの利用を可能とし、大規模な原子力産業を産み出した。また、21世紀には核融合エネルギーの使用も可能となることが予想されている。より小規模な小型加速器による半導体のイオンインプランテーション、電子線による高分子の架橋改質などは目立たないが、社会生活への影響の大きさはエネルギーへの応用にひけを取らない。

しかし、1950年以降に素粒子研究の進捗に伴って開発された大型加速器の社会的要請の大きい問題への応用はこれからであって、最近に至って、シンクロトロン放射光、自由電子レーザー発生への利用が緒についた程度である。われわれは原子力がすでに人類のエネルギー源として不可欠なものとなった以上、その現在および将来に予測される問題の解決が重要であると考え、「中性子ターゲットシステム」研究専門委員会を1979年4月本学会に設置し、原子炉構造材の照射損傷の研究や核燃料の増殖および原子炉で発生する放射性

廃棄物の処理等に使用し得る大強度中性子発生システムについて検討を開始した。

上記委員会は2年の延長期間を含めて1983年3月に終了するまでに、800 MeV 陽子シンクロトロン・パルス中性子源、熔融塩ターゲットやターゲット内中性子分布解析法等を論じた。その間に高エネルギー物理学研究所の大強度パルス中性子源の目覚ましい成果もあったが、一方化石燃料資源の供給不安の顕在化もあり、大型加速器技術のこれらの課題解決への適用可能性をさらに調査する必要性が痛感されるに至った。

* 構成委員：第1期 28名(1983年10月～1985年9月)

第2期 35名(1985年10月～1987年9月)

(敬称略、順不同。◎主査、○幹事、*第1期のみ、*第2期のみ)

- ◎木村 一治(東北大)(第1期)
 ◎(故)塚田甲子男(日大)(第2期1985年12月まで)
 ◎小寺 正俊(理研)(第2期1986年1月から)
 ・朝岡 卓見(原研) 浅見 明(高工研) 浅見直人(三菱重工)
 ・井澤 正孝(原産) 大石 晃嗣(清水建設) 大野 忠雄(東芝)
 岡本 和人(東学芸大) 片岡 治雄(一) 加藤 義夫(原研)
 上坪 宏道(理研) 河合 広(近畿大) 河原崎雄紀(原研)
 ・黒井 英雄(原研) 小佐古敏荘(東大) 斎藤 実(原産)
 佐々木 寛(高工研) 住田 健二(阪大) 相山 一典(東北大)
 千葉 康(東工大) 富増多喜夫(電総研) 豊田英二郎(住友重機)
 ◎中原 康明(原研) ◎中村 尚司(東北大) 中村 知夫(原研)
 ◎西田 雄彦(原研) 橋爪 朗(理研) 福本 貞義(高工研)
 平尾 泰男(放医研) 古川 和男(東海大) 藤田彪太(三菱電機)
 前川 明嗣(日立) ・森 一久(原産) 山室 信弘(NAIG)
 和久田義久(九大) ◎渡辺 昇(高工研)
 常時参加者：石野 昌樹(東洋エンジ) 仲佐 博裕(電中研)

「中性子ターゲットシステム」研究専門委員会は1983年の終了報告(本誌, Vol.25, No.5, p.344~355)においてその調査報告とともに課題を述べている⁽¹⁾。また別冊報告書『スボレーション中性子工学』において中性子源の観点に加えて、放射性廃棄物の核変換消滅処理、核燃料増殖について世界の技術状況を紹介した⁽²⁾。

当委員会は、上記の趣旨を受けて1983年10月に発足し、消滅処理、核燃料増殖技術に重点を置いて、関連加速器技術、解析コード、消滅処理の優先順位判定に関連する放射性同位元素の毒性評価、ICRPの被曝許容量改訂、消滅処理や核燃料増殖により新たに発生する核種の評価、スボレーション中性子スペクトルの解析、大強度加速器の安全性など広範なテーマを取り上げてきた。第2期の後半に、放射性廃棄物の消滅処理が科学技術庁の高レベル廃棄物の処理処分に係わるフェニックス計画の一環として取り上げられるに至ったことは委員一同が喜びに堪えないところである。当委員会の活動のすべてを限られた誌面で報告するのは難しいので、以下に概略を記して、会員各位の参考に供する。

(主査 理研・小寺正俊)

Ⅱ. 加速器開発の現状

原子核、素粒子研究の進歩に伴って加速器技術も急速に進歩し、多くの巨大加速器が出現した。加速エネルギーは十分に大きくなり、ここで考える工学的応用の検討のための基礎データを得ることは可能となったが、工学的規模の実用機の実現には研究用とは異なった条件が満たされる必要がある。まず平均ビーム電力が3~4桁大きくなければならない。電力効率、信頼性、運転保守の容易さ、耐用年数、安全性など課題は多い。実用機の前パイロット機も1段階では済まないかも知れない。各段階ごとに多くの技術開発が必要であらう。

例えば、誌面の都合で記載できなかったが、陽子の加速に従来の常識を破った進行波加速方式リアックの案⁽³⁾がある。1~2 GeV、平均電流数 mA までなら可能とのことで、電子リアックで開発されてきた技術を利用でき、パイロット規模加速器として魅力がある。しかし、最終的に必要な数 100 mA の加速は不可能なので、本報では割愛することとした。今後も研究用機とは異なった観点を持つ実用機開発が必要であり、多様な提案を受けて技術が進歩することを期待したい。

(理研・小寺正俊)

1. 陽子加速器

工学的応用として 1 GeV、100 mA の Accelerator

Breeder を将来の目標とすると、加速器の機種は直線加速器(リアック)となる。高エネルギー陽子リアックは1970年代の初期にロスアラモス国立研究所(LANL)で 800 MeV のものが製作され、ソ連で π 中間子工場用に製作中と報じられているほかには製作されていない。リアックでは陽子は多数の高Q空洞内を次々に通過して高周波電界(既存のものは 200~800 MHz)により加速される。その構成は、①陽子または H⁻イオンを生成するイオン源、②従来は Cockcroft-Walton 装置が用いられ、RFQ*(Radiofrequency Quadrupole)が期待されている前段加速器、③L. Alvarezにより考案され最も技術が確立している DTL(Drift-Tube Linac)、④各種の加速構造が競合している主加速部である。

(1) PIGMI と SNQ

LANL では癌の π 中間子治療用として小型で病院内に設置可能な リアック PIGMI (Pion Generator for Medical Irradiation) (650 MeV, 100 μ A, 全長 134 m) の開発を行なった⁽⁴⁾。平均電流が低く 24 h 連続運転を想定する必要はないので、残留放射能の面から加速中の若干のビーム損失は許容される。そこで加速管内のビーム孔径を 2 cm と小さく選ぶことが可能となり、したがって小型化、低価格の要求とあいまって主加速部空洞の高周波を 1,320 MHz としている。LANL での癌の π 中間子治療実験は中止され、PIGMI は実現しなかったが、その設計は最近のハドロン計画*等に影響している。

Jülich の KFA では Spallation 中性子源(SNQ)に 1,100 MeV, 5 mA, 全長 642 m のリアックを設計した⁽⁵⁾。この提案も政府に認められなかったが、いろいろの点で PIGMI と対照的である。すなわち平均電流が高いので、加速中のビーム損失を低減するために主加速部のビーム孔径を 7 cm、加速空洞の共振周波数を 201 MHz とし、Hands-on の保守作業を可能と想定した。

1986年秋に運転を開始した高エネルギー物理学研究所 TRISTAN 主リングの高周波加速空洞のビーム孔径はビーム分布パラメータ σ の 10 倍に相当する 10 cm で、現在 1 h 程度の蓄積ビームの寿命は空洞との衝突による損失ではなく真空による。これはビーム孔径の適切な選定でビーム損失による放射化の低減が可能なことを示す。空洞の実効 shunt impedance* は加速高周波の周波数の平方根に比例するので、高い周波数の方が電力効率が低い。しかし超伝導空洞が用いられる

* 以下、本文中に*印のついた用語は、[付録]に解説がある。

と、空洞壁の高周波損失が激減して高い周波数のこの利点はなくなる。

PIGMI の主加速部は11 cell を含む tank 108 個を高周波的に接続したもので、全体が1つの空洞を形成している。SNQ では高周波的には独立した640個の cell から構成されていて、それぞれが独立の電力増幅器により励振される。もちろん SNQ は PIGMI より高価になる。したがって、実際の設計に当っては何を重視するかによって、この両極端の間のいずれかの方式を選ぶことになる。

(2) RFQ

DTL の shunt impedance が低速度の陽子に対して急速に低下するため前段加速のエネルギーは高い方が望ましく、RFQ はこれに応じるものとして1970年代の終りから広く研究された。加速と集束を高周波で行うために高電界が必要であるが、 $\sim 100 \mu\text{s}$ の小 duty factor のパルス動作では Kilpatrick 限界*の2倍、cw*では1.5倍までは放電せずに使用可能といわれている。FMIT*(6)では80 MHz の cw-RFQ の開発を始めたが本計画が中止になり、途中から研究費が SDI(戦略防衛構想)から支出されて研究結果が公表されなくなった。ビームパルス幅が長くなるとビームが放電を誘発する模様である。

RFQ は加速したビームの emittance* が小さいのが特徴であるが、これは RFQ の acceptance* が $0.5 \sim 1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ と小さいことを意味し、既存のイオン源を用いた場合には400 MHz RFQ により目標とするビーム強度を得るのは困難と予想される。

(3) 高周波(RF)系

リニアックでは、RF 系は加速器本体よりもむしろ高価であるので、どの帯域を選択するかは本体の加速構造の選択と同様に重要である。200 MHz 以下では3, 4 極管が、400 MHz 以上では klystron が使用されている。PIGMI の RFQ, DTL の RF に 430 MHz を、主加速部にその3倍を選択した理由の1つは市販の klystron(pulse)の存在である。TRISTAN には509 MHz を必要とするが、そのような市販品はなく、1 MW-cw-klystron が開発された。最近 VHF, UHF の大電力固体増幅器が急速に発展しつつある。TV 放送用は cw, SDI はパルスで将来リニアックに寄与すると期待している。

(高エ研・福本貞義)

2. 電子加速器

電子加速器が、原子力界というコミュニティの中で、その存在価値を再評価されようとしている。具体的には、①高輝度シンクロトロン放射光(SOR)源の開発

と、その利用が広い分野での研究・開発を著しく促進させることへの期待、②自由電子レーザー(FEL)の開発と、その利用・応用への期待、③大強度単色陽電子ビームの発生と、その利用への期待からといってよいだろう。これまでは、電子線、X線や γ 線照射用としての利用が主なものであった。上記のものは、より高度な利用形態である。原子力委員会が1987年6月に改定した「原子力開発利用長期計画」(7)にもその期待が述べられている。

過去において、加速器は原子核物理の実験的研究のために開発されてきた。現今では、核を構成する素粒子やさらに基本的な粒子(クォーク)の研究のために開発されている(8)。加速器科学・技術の最先端は常にこのような所にあつて、その時点ではちょっと応用が考えにくいほどであるが、やがて広範な利用・応用を生み出してきている。

いま世界で鎚を削って開発が進んでいる超大型電子(陽電子)加速器複合体が3つある。その1つが、高エネルギー物理学研究所(KEK)にある TRISTAN(Transposable Ring Intersecting Storage Accelerators in Nippon)(9)である。すでに運転に入り、一部の実験が開始され、その結果によると、トップ・クォークの質量(エネルギーと同等)は、現在の TRISTAN の出力エネルギー($< 30 \text{ GeV}$)を上回っているとのことである。現在 TRISTAN では主リング(MR)内30個所以上に超伝導空洞加速部を追加設備してエネルギー上昇($< 40 \text{ GeV}$, Phase II)に大童である。

TRISTAN は、電子-陽電子(e^-e^+)衝突リングである。MR の直径約1 kmで、4個所に大型検出器(重さ2,000 t)が置かれている。 e^+ ビーム蓄積と予備加速(6 GeV)のために直径約100 mの入射蓄積リング(AR)がある。AR には、長さ400 m、エネルギー2.5 GeV のリニアックから e^- と e^+ が打ち込まれる。 e^+ 発生用に別の200 MeV リニアックが付属している。

リニアックで加速された2.5 GeV の e^- (または e^+)は、SOR 蓄積リングにも入射される。リニアックとリングとで、放射光施設(Photon Factory; PF)を形成している。PF での成果は高く評価され(10)、次世代(6~8 GeV)SOR 施設建設の原動力になっているといってもよい。

一方、米国スタンフォード大学では、SLAC(11)(長さ2 mile の電子リニアック)を増力し、50 GeV まで上昇させ、同時に e^+ も加速できるようにして、 e^-e^+ 衝突をさせる装置(SLC)(12)を開発している。衝突点におけるビーム径は $\sim 1 \mu\text{m}$ で、8月に成功し、内輪

の祝賀パーティが催された。1987年中に稼働する。

ヨーロッパでは、スイスの CERN の LEP⁽¹³⁾ (Large Electron Positron-Collider-) が 1988 年にも動き出す。最終的には 100 GeV になる。リング周 26.7 km (直径 8.5 km) で、1,000 人以上の物理学者が加速器開発と実験に参加する。

電子の範ちゅうを外れるが、西独ハンブルグ大学では、電子-陽子衝突リング HERA⁽¹⁴⁾ を建設中である。DESY-PETRA-HERA の複合体である。

高エネルギー物理研究用として計画されているものに、米国の SSC⁽¹⁵⁾ (Superconducting Super Collider, 直径 28 km, ただし陽子加速) と、日本の JLC⁽¹⁶⁾ (Japan Linear Collider; e^-e^+) がある。国家レベルでの論争をも引き起す。SSC では、高温超伝導材開発が論議に油を注いでいる⁽¹⁷⁾。

中間エネルギー領域 (数 GeV) での原子核物理研究 (クォークの自由度を取り入れた視点) 用として、同時計測が可能な連続ビーム (RF-マシンはパルス的である) 電子マシンが適している。数年前から東北大では、リニアック+パルス・ストレッチャを提案し続けている⁽¹⁸⁾。米国では、最終的に CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility, 500 MeV 超伝導リニアックを 2 台おき、4 回周マイクロtron* を形成して 4 GeV ビームを得る) に落ち着いた⁽¹⁹⁾。この影響はフランスのサクレに及んでいる⁽²⁰⁾。

SSC にせよ、CEBAF にせよ、これまでの常温式 (常伝導) から超伝導型に移ったことが特徴である。それに、リニアック (直線型) だけでなく、リサーキュレーションとかマイクロtron 方式が取り入れられ、加速機構が高度化している。

FEL* が注目されている。波長可変、大出力可能が魅力なのだが、米国レーガン政権の SDI もそれに拍車をかけている。1976 年から 77 年にかけて、スタンフォード大学 HEPL (High Energy Physics Laboratory) の超伝導リニアック (SCL) で、FEL の増幅・発振に成功したのが端緒である⁽²¹⁾。現在では、リサーキュレーション回路を付け、エネルギーを 2 倍にして可視 FEL を発振させている⁽²²⁾。

この SCL は、1960 年代後半から核物理用に開発されてきたものである。ビーム特性が良く FEL に利用できたものと考えられる。一方、20 年前に製作された常伝導リニアック Mark III (SLAC の前身) の加速管を利用して、ただし入射部だけは新規なものにして、高質ビーム加速を成し遂げたこと⁽²³⁾ は注目に価する。この加速器を中心に Stanford Photon Research Labo-

ratory (SPRL) が組織されつつある。

LANL でも、サイド・カップルド・リニアック (常伝導) で発振に成功している。ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) では、大電流磁気誘導リニアック (ETA) で、ミリ波大電力増幅の実験をした。ETA は ATA (Advanced Test Acc.; 50 MeV, 10 kA) というすごいものになって行く。米国民間企業でも FEL 専用のリニアック (常伝導・超伝導) を開発している。例えば、ボーイング社では専用リニアックを 2 年半で完成させて可視発振に成功した。

イタリアのフラスカッチャ、日本の原研でも専用 SCL-FEL 計画をもっている。ユニークな FEL システムとして、カリフォルニア大学サンタ・バーバラ校のバンデグラフを用いたものがある。直流ビームであるので、単一モードのレーザーが発振できる⁽²⁴⁾。バンデグラフ利用の FEL 計画もいくつか続いている。世界の多くの研究所・大学で FEL の実験を行っており、SOR リング利用もある。

陽電子利用を目指した研究・開発も始まっている。LLNL、西独 Maintz が先行し、ベルギー Gent、西独 Giessen、オークリッジ国立研究所 (ORNL)、日本では電総研、原研が続いている。原研では、低エネルギー e^+ の閉込めに成功した⁽²⁵⁾。

工業・医療用として、ユーザーの立場に立ったコンパクトでユーザー・フレンドリーなライナックも数多く作られている。思いがけない分野での利用・応用も考えられていて、これからも特徴ある加速器が開発されて行くだろう。 (原研・河原崎雄紀)

Ⅲ. 加速器の工学的応用研究の現状

加速器の工学的利用分野においては、イオン・インプランテーション、アイソトープの製造、高分子の改質、非破壊検査などすでに確立されている技術や、近年急速に利用技術が開発されつつあるシンクロtron放射光 (SOR) に加えて、さらにフロンティア研究としてのミュー中間子触媒核融合、偏極粒子核融合等を挙げることができるが、本章においては、将来原子力分野において大きな役割を果し得る可能性を持っている陽子加速器による原子核スποレーション反応の応用技術に重点を置いてまとめるを行う。

加速器による核燃料増殖については、ORNL の 3 元合金燃料増殖炉⁽²⁶⁾ と東大の回転炉心型増殖炉⁽²⁷⁾ の提案が新しい動きとして注目される。一方、放射性廃棄物消滅処理への応用がわが国においても注目されつつある。

原子炉では実現困難な超強力中性子源を可能にするものとして、ス波レーション中性子源をめぐる動きには慌しいものがあつた。高エ研では1985年に減損Uをターゲットとする KENS-I⁽²⁸⁾が完成、同年英国で中性子源用 800 MeV 陽子シンクロtronが運転を開始している。さらに、意欲的な計画として注目を集めた西独の SNQ 計画⁽²⁹⁾が予算獲得競争に破れて消滅する一方、イスラ 研究所が FMIT に代わる核融合炉材料照射試験用ス波レーション中性子源 EURAC⁽³⁰⁾をユーラトムの計画として提案していることなどが主な動きである。

(原研・中原康明)

1. 加速器による核燃料増殖

Harms は、核エネルギーシステムにおける加速器利用を4種に分類している⁽³¹⁾。①核融合親物質ターゲットを加速したイオンまたは飛翔体で衝撃的に慣性閉込め核融合させるもの、②高速陽子のス波レーション反応による核分裂性物質増殖、③加速器で生産されたミューオンによる触媒核融合、④中程度(15 MeV 以上)の加速陽子により核分裂生成物消滅を行いつつ核分裂性物質を増殖させる、というものである。④に関

して体系的な考察を加え、消滅作業を行いつつ全体としてエネルギーの正の利得を期待できる場合もあることを示した⁽³¹⁾。

これらの例からも明らかなように、加速器による核燃料の増殖過程でのエネルギー利得が核分裂を含ませる(増殖させる)ことにより改善できるのは明白で、上記4方式とも次第にその方向を目指すようになってきている。例えば、①でも国内の例を挙げれば、熔融塩ブランケットを用いたトカマク型核融合増殖炉⁽³²⁾、慣性核融合増殖炉⁽³³⁾があり、また最近ではDT球を仕込んだ飛翔体をプラズマ加速する衝撃核融合熔融塩増殖炉構想⁽³⁴⁾も示された。

しかし、物理的技術的基礎の明確なのは、依然②の方式であつて、ORNL からより詳細な計算による工学的条件の考察が発表されている⁽²⁸⁾。これは先に液体 Na を中央ターゲット部とした三元合金燃料増殖炉を、さらに改良したものである。陽子は、エルレンマイヤー・フラスコ状の空間に拡げられ、その底部(直径4 m)に(cosine)²分布で入射せられる(第1図参照)。第1壁は、V-20% Ti 合金(4mm 厚)からなり、次に

第1図 改良型三元合金燃料加速器増殖炉(TMf-ENFP, ORNL)本体の縦断面模型図⁽²⁸⁾

5mm 径の球状燃料(75~78% ^{232}Th -16% ^{238}U -3~6% ^{239}Pu)の Ni 被覆(0.2mm 厚)されたものが底の部分に充填され、液体 Na で冷却されるターゲット部を構成する。ブランケット部には、同様な形状の Th 金属球が充填される。

燃料体は90日間の照射ごとに取り換えられるとしているが、3% ^{239}Pu の場合には1.5 GeV, 300 mA のビーム入射に対し、 ^{239}Pu 消費 0.31 kg/d で ^{233}U 生産が 3.61 kg/d(差引き 3.3 kg/d の生産)であるのに対し、6% ^{239}Pu の合金燃料の場合には ^{239}Pu 消費 3.41 kg/d で ^{233}U 生産 9.29 kg/d(差引き 5.9 kg/d の生産)と述べている。なお、発熱量はおのおの 1,492 および 5,292 MWth であり、 ^{233}U 生産はおのおの 7 および 22 g/d であるという。

この 6% Pu 合金の場合には、年率で 0.92 t の ^{239}Pu が燃焼させられるが、これは 4 基の軽水炉が産出する Pu 量を消費させることに相当し、生産する年率 2.51 t の ^{233}U によって、9 基の軽水炉が稼働できるとしている。

この炉の形状は、一見 BNL の設計⁽³⁵⁾によく似ているが、後者では陽子ビームを振らしていたのを、技術の進歩で動かす必要がなくなったとのことである。しかし、第 1 壁の最大発熱量は 2.5 kW/cm² であり、照射損傷により 90 日ごとに全面的取換えが必要としている⁽²⁶⁾。6% Pu 燃料球の発熱密度は 12 kW/cm³ である。なお、5mm 径の球状燃料構想は、経済性を含めて種々の工学的問題を含んでいるであろう。少なく

も Na の出入口温度 562, 327℃ に対し、被覆および第 1 壁の最高 800, 875℃ では、材料と液体 Na の共存性が保証できないであろう。したがって、工学的実現性はまだ遠いと考えられる。

松本ら⁽²⁷⁾は、種々の物質についてパラメータサーベイを行なった結果として、金属 U を Na で冷却するターゲットの燃料生産能力が最も高い(入射陽子当り約 80 個 Pu)とした。しかし、その実現に必要な除熱問題の解決には、炉心を回転させつつそれに斜めにビーム入射することを提案するにとどまっている。

核燃料増殖サイクルの実用化に向かっては、全システムの設計に際して少なくとも次の 2 点が決定的な重要性を持ってくるであろう。1 つは、いうまでもなく増殖された核燃料の供給を受ける核分裂炉の特性であり、その燃料消費率が大きな影響力を持つ。一定量の核分裂性物質により運転維持される動力炉の数は、

$$S = \eta_e / (1 - CR)$$

に比例するであろう。ここで、CR は燃料転換率、 η_e は発電効率である⁽³⁸⁾。代表的な設計例に対する S を第 1 表に示す。熔融塩発電炉については、最近の研究により、150,000 kW_e の小型炉でも種々の設計により、CR=0.95~1.0、 η_e =44~46% が充分期待できることが示され、2 つの例を選んである。なお、この小型炉では、炉内黒鉛の交換不要で無蓋単純な炉容器でよく、ほとんど化学処理の不要であることや低い余剰反応度とともに高い安全性・経済性が期待される⁽³⁷⁾。

第 1 表 一定量の核燃料で支持できる動力炉の数 S

	軽水炉	重水炉	高温ガス炉	熔融塩炉		
電気出力 (MWe)	1,100	745	1,160	155	161	161
発電効率 η_e	0.33	0.29	0.39	0.44	0.46	0.46
燃料転換率 CR	0.55	0.8	0.65	0.95	0.98	1.0
$S = \eta_e / (1 - CR)$	0.73	1.45	1.11	8.8	23.0	∞

いま一つの要素は、増殖炉・動力炉を組み合わせた核エネルギー協働(synergetic)システム⁽³⁹⁾における具体的な燃料サイクル全体の単純性・合理性である。加速器増殖炉に固体ターゲットを採用する限りその合理化には制約が多いが、熔融塩方式であれば、増殖炉より単純に移送すればよく、またこの炉では CR≠1.0 であるから、燃料補給必要量は少なく、陸上輸送量を極端に減少でき、ほぼ理想に近づく可能性を持っている。超ウラン元素消滅処理兼用にもほとんど何の障害もない⁽³⁷⁾。

(東海大・古川和男)

2. 放射性廃棄物の消滅処理

消滅処理とは、放射線による核反応を利用して長寿命放射性核種を短寿命あるいは安定な核種に変換することである。消滅処理方式としては、中性子を利用する原子炉、核融合炉方式および陽子線または γ 線を用いる加速器方式が提案されている。消滅処理の対象となるのは、FP(核分裂生成物)核種と TRU(超ウラン)核種である。それらの中の代表的な核種は ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{99}Tc ; ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm 等である。

FP の消滅処理については、1973 年に日本原子力産

業会議によって⁽⁴⁰⁾, 1974年には米国 Battelle 研究所 (BNWL)によって⁽⁴⁰⁾技術的可能性についての調査検討の結果が報告されている。FP 核種の ^{90}Sr と ^{137}Cs については、熱中性子断面積が小さいため、効率よく処理するには $10^{16}\sim 10^{17} \text{ n/s}\cdot\text{cm}^2$ の熱中性子束を必要とする。したがって、通常の原子炉による処理は極めて困難なため、その後の研究は加速器方式が主になっている。高エネルギー陽子によるスポレーション反応とそれに伴って発生する中性子を用いる方法については高橋らが検討している^{(41)~(43)}。大出力陽子リニアックを用いても 10^{17} のオーダーの中性子束を発生させるのはコスト的に容易ではなく、それに代わる方法として松本らは γ 線を用いる方法を提案している^{(44)~(45)}。この方法は15 MeV 付近を中心とする (γ, n) 反応の巨大共鳴を利用するものである。この反応の断面積は約0.3 bであるが、開発の比較的容易な大電流電子リニアックにより高 γ 線束が得られる利点があり、今後の研究の進展が注目される。

TRU の消滅処理については、専焼高速炉⁽⁴⁶⁾と陽子リニアック⁽⁴⁷⁾を用いる方法の研究が原研で開始されている。専焼高速炉における基本的な問題点は、消滅処理に核分裂を利用するため TRU が消滅しても新たに FP が生成されることである。

陽子リニアックによる TRU の消滅処理においては、基本核反応として入射陽子と高速2次粒子によるスポレーション反応を利用する。この方式の実質的な研究は、世界的にみてもスタートしたばかりの段階で、まとまった研究報告は未だ発表されていない。このような状況の中で原研においては数年前から消滅処理の準備研究として SP(スポレーション生成物)分布を計算するためのコンピュータ・シミュレーションコードの開発とスポレーション反応モデルの改良研究が進められてきている^{(48)~(49)}。SP 核種生成断面積の測定は LANL⁽⁵⁰⁾ やソ連のラジウム研究所⁽⁵¹⁾で行われている。

実用規模の加速器としては、陽子エネルギー 1.5 GeV、ビーム強度0.3 A のリニアックが想定されている⁽⁴¹⁾。この規模の加速器でどのくらいの量の TRU を処理できるかを予測するために原研で行われた予備的計算の結果を第2表に示す。天然Uターゲットで計算してあるが、TRU の場合もほぼ同一と考えてよい。この結果から判断すると、1.5 GeV の場合、15 MeV 以上の粒子によるスポレーション反応だけで電気出力 1 GW の軽水炉4基分の TRU を消滅処理できるという目安になる。さらに約58個の余分の中性子も消滅処理に振り向ければ、10基分以上の TRU の消滅処理

が可能である。余分の中性子は核燃料増殖に利用することにすれば、ターゲット内で消滅処理をしながら同時にブランケット内で年間 1 t 以上の ^{239}Pu の生産が可能である⁽⁴¹⁾。

第2表 天然Uターゲット中入射陽子と15 MeV 以上の高速2次粒子によるスポレーション反応に対する消滅核種数と15 MeV 以下の発生中性子数

入射陽子エネルギー(GeV) ^{†1}	1.5	2.0	2.5	3.0
消滅核種数/入射陽子	5.3	6.8	8.3	9.6
生成中性子数/入射陽子 ^{†2}	57.9	73.8	88.6	102.8
スポレーション反応のみで 処理可能 TRU 量に相当 する1 GWe LWRの基数 ^{†3}	4.0	5.1	6.2	7.2

^{†1} ターゲットサイズ: 半径10 cm, 長さ60 cm.

^{†2} 15 MeV 以下の中性子に対するバランスの式における外部中性子源に相当。これらの中性子はさらに他の用途に利用可能。

^{†3} 1 GWe LWR, 33,000 MWd/tからの TRU 量を 23.1 kg, 陽子ビームを0.3 A として算出。

消滅処理が意味を持つためには、長寿命放射性核種が SP として生成されない、生成されたとしても微量であることが必要である。第2図は1 GeV の陽子に

分類 (Decay class)

1. $T \leq 1 \text{ ms}$,	6. $5 \text{ d} < T \leq 1 \text{ yr}$
2. $1 \text{ ms} < T \leq 1 \text{ s}$,	7. $1 \text{ yr} < T \leq 100 \text{ yr}$
3. $1 \text{ s} < T \leq 1 \text{ min}$,	8. $100 \text{ yr} < T$
4. $1 \text{ min} < T \leq 1 \text{ h}$,	9. 安定核種
5. $1 \text{ h} < T \leq 5 \text{ d}$	

第2図 1 GeV の陽子による ^{241}Am のスポレーション生成核種の半減期 (T) 分布 (核種個数/陽子1個)

対する ^{241}Am の SP についての西田らのモンテカルロ計算結果を半減期によって分類したものである。半減期 100 yr 以上の核種は、同図に CLASS 8 として示されているように、極めて微量であることがわかる。このことはスポレーションによる消滅処理の有望性を示すものであり、今後の研究の進展が期待される。

(原研・中原康明, 西田雄彦)

3. 超強パルス中性子源

(1) 高強度スポレーションパルス中性子源

KENS-II 計画に関するニュートロニクス

中性子散乱等の中性子ビーム実験のためのわが国における次世代の中性子源として、瞬間熱中性子束が $1 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{th}}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ を凌駕するスポレーションパルス中性子源を建設しようとする KENS-II 計画が数年来検討されてきた。この計画は現在、高エネルギー物理学研究所で行われている中性子散乱および μSR^* の研究をさらに発展させるため、800 MeV, 500 μA の大強度陽子シンクロトロンの新設を含む実験ファシリティの建設を目指す GEMINI 計画として進められてきた。

一方、わが国の原子核研究者グループでは、やはり大強度陽子ビームを必要とする KAON 実験施設をつくらうとする大ハドロン計画と呼ばれる計画が検討されてきた。近年に至り、この両計画が大型ハドロン計画として1つにまとめられ、その実現が近づいている。大型ハドロン計画の加速器は、入射器として1 GeV 陽子リニアックを主軸に、第1リングと称せられるラビッドサイクル陽子シンクロトロンおよびそれに続く加速器により構成されるが、この第1リングが GEMINI の役を兼ねることになる。

問題はその仕様、特に陽子ビームエネルギーである。スポレーションパルス中性子源のためには繰返しは50 Hz 以下、パルス幅は約 250 ns 以下、エネルギーは1 GeV 前後が望ましい。このことは、かつて計画され、あるいは現存する大型スポレーション中性子源の陽子ビームエネルギーが 0.8~1.1 GeV であることから明らかである。

一方、 μSR グループは、ミューオンのもととなるパイオンの収量が約 1.5 GeV まで急激に増加するため 1.5 GeV 以上が望ましく、さらに GeV 領域のパイオンを用いる原子核研究者は2 GeV 以上、また大強度の K 中間子ビームをつくるためには3 GeV 以上が必要ということになる。

このような状況のもと、中性子源としてはどこまで原子核研究用と共存できるかをまず明らかにする目的で、種々のニュートロニクスの検討が進められてい

る⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾。計算は中原ら⁽⁵⁴⁾により改良された高エネルギーハドロン輸送コード NMTC/JAERI (15 MeV 以上) と通常の核断面積セットを用いて 15 MeV 以下の輸送計算を行うモンテカルロコード MORSE を組み合わせて行われた。計算のモデル体系は第3図に示すように、10 cm ϕ $\times$ 32 cm の円筒形ターゲットに直径 5 cm の一様な陽子ビームを入射させ、ターゲット上下に各2個計4個の標準減速材(実際には特性のそれぞれ異なるものを置く)を配置し、中性子ビーム取出し孔以外はすべて Be 反射体で囲んである。

第3図 スポレーション・パルス
中性子源の計算モデル

第4図は、全中性子収量を陽子エネルギーに対してプロットしたもので、種々のターゲット物質について比較してある。収量は約1.1 GeV までは陽子エネルギーに比例して増加するが、それ以上で次第に飽和の傾

第4図 種々のターゲット物質に対する全中性子
収量の陽子エネルギー(E_p)の依存性

向を示す。単位陽子ビーム出力で比較すると、1 GeV前後での値を1として、2 GeVでは約0.72に、3 GeVでは約0.53に減少する。これだけから判断すると、中性子源としてはズバリ1.5 GeV以上ではかなり効率の悪いものになってしまう。

次に、ターゲット中での発生中性子の空間分布について調べてみる。第5図は陽子ビーム軸方向の分布で、半径方向については積分してある。最大照度は陽子エネルギーであまり変わらないが、高いエネルギーでは分布がより長くなり、明るい部分がそれだけ広がる。単位陽子ビーム出力で比べると、陽子エネルギーの高い方が最大照度は低くなる。このため、4個の減速材をどのように配置するのが最適かは、陽子エネルギーにより異なってくる。この様子を0.8と2 GeVの場合について比較したのが第6図で、それぞれ上流側(1st)および下流側(2nd)に置かれる減速材から得られる熱中性子ビーム強度、ならびに両方の和が、置かれる場所 x の関数として示してある。ここに簡単のため、両減速材の間隔は5 cmに固定してある。このように発生中性子の空間分布を考慮して減速材から得られる中性子ビーム強度の最適化を図ると、単位陽子ビーム出力当りの熱中性子ビーム強度の2つの減速材についての和は、2 GeVの場合でも0.8 GeVの場合の0.73となり、全中性子収量の比以上に改善することは無理のようである。

第5図 劣化Uターゲット中での発生中性子の陽子ビーム軸方向分布

(2) 外国における現状

英国ラザフォード・アプルトン研究所のスポレーション中性子源 ISIS は、中性子散乱研究を主目的として建設された世界最大 ($10^{18} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 級) のパルス中性子源で、加速器は入射器としての 70 MeV 陽子リニアックと 800 MeV 陽子シンクロトロンより構成されているが⁽⁵³⁾、1985年12月運転開始以来順調にビーム出

第6図 減速材の位置 X と熱中性子ビーム強度(n_{th})との関係

力を増し、平均ビーム電流200 μA の設計値に対し、最近90 μA の世界新記録を更新した。陽子ビームエネルギーは現時点では約750 MeV である。

米国 LANL の同種施設 LANCE は800 MeV 陽子リニアック LAMPF⁽⁵⁴⁾ からのビームをストレージング PSR に入れて単にショートパルス化するだけであるので、ISIS より早く設計ビーム電流(100 μA)に達すると考えられていたが、現在 ISIS の約半分のところにある。ISIS でも電流値約30 μA で大きな壁につき当り、シンクロトロンの中を回っているビームのためマイクロ波電力が必要なだけ入らないという困難があったが、加速キャビティを水負荷でシャントレイビダンスを下げることにより克服した。ISIS のシンクロトロンの特長は、ビームロスをするだけ小さくするための工夫が種々試みられている点にあるが、これらが功を奏しビームロスが極めて小さい点にある。この成果は今後の大強度陽子加速器の開発に重要な意義を持つものと考えられる。(高・研・渡辺 昇)

Ⅳ. 加速器の安全性

ここで考えられているような大強度加速器からは大量の放射線、特に中性子が放出されるので安全対策は非常に重要である。特に考慮しなければならない安全対策と放射線管理上の問題について述べる。

1. 機器(マグネット、ビームダンプ等)の放射化と作業者の残留放射能による外部被曝

ビーム損失が非常に少ないとしても大強度のため無視できず、このようなビームを受ける機器は強く放射化され、作業者の被曝が大きな問題になる。さらに、加速器の運転時間が増えるとともに残留放射能の量も増え、同時に長年の運転に伴う保守の必要も増えてくるので、あらかじめこの放射化をコントロールする対策を立てておかねばならない。この対策として次のようなことが考えられる。

- (1) ビーム損失のできる限り少ない加速器およびビーム輸送系を設計開発する。
- (2) 高放射線場での作業は遠隔操作で行う。
- (3) 構造を簡単にし、耐放射線材料を用いて故障を少なくし、かつ保守の容易な加速器とする。
- (4) 放射化の少ない材料を開発し、加速器構造物やコンクリートに使用する。
- (5) ビーム損失の多い箇所はそれ全体を遮蔽体で囲んで、作業者が近づく必要のないようにする。
- (6) 高放射能物質を保管する場所を最初から余裕をもって作っておく。

2. 地下水の放射化

中性子による放射化で生成される放射性核種のうち最も問題となるのが、半減期が12 yr と長いトリチウムである。このトリチウムの生成を法的に許容されるレベル以下に抑えるために、加速器建屋の地下下のコンクリートの厚さを充分にとり、ここに地下水が浸み込まないようにすることが必要で、地下水脈の流れ等に留意する必要がある。

3. 環境放射線による周辺住民の外部被曝

加速器建屋から漏洩する放射線、特に中性子による周辺住民や施設内職員の外部被曝を評価し、抑制する。

- (1) 一般に、地上部にある建屋外表面からの漏洩による中性子の空中伝播が主であることから、建屋を地下または半地下構造として大地の遮蔽効果を利用するとともにコストダウンを図る。
- (2) しかし、加速器が地下でも実験室が地上にある場合は、そこからのスカイシャインが問題になる場合がある。このため地上の実験室では弱い1次ビームまたは2次ビームのみの実験にして、2次ビームやRIを作るためのターゲットなどは地下に設置するのがよい。
- (3) 敷地に限りがある場合は、敷地境界での線量を規制値以下にするため遮蔽体の厚さをより厚くする必要が生じる。

4. 空気放射化と作業者の内部被曝および排気

加速器室内のビーム損失の大きい所では、陽子加速器では主に中性子、電子加速器では主に制動放射X線により空気が放射化される。また NO₂ や O₃ のような有毒ガスの生成もある。

- (1) 1次ビームが空気をたたいた時は、中性子やX線のような2次ビームによる放射化とは比較にならないほど放射能を生成するので、ビーム輸送中や実験エリア内で1次ビームが直接空気をたたかないようにする。
- (2) 加速器室やビームダンプ周辺の高放射能の空気は完全密閉方式とする。短寿命核種が多いので、その壊変をまって放射能レベルがある程度下がってから換気する。また隙間からのリークを防ぐため加速器室内は負圧に保つべきであろう。この密閉方式で、NO₂ などにより機器が腐食され易くなるので、耐腐食性材料の使用等を考える必要がある。
- (3) 緊急時以外は、ある一定の冷却期間を経ない限り入室できないシステムとする。

5. 冷却水の放射化

1次冷却水(マグネットやターゲットなどの)中にも放射能が生成される。

- (1) 冷却水中に生成される放射能は、トリチウムを除いてはイオン交換樹脂で除去される。この樹脂を適宜交換する。
- (2) トリチウムは放射能レベルが法の規制値より充分低い間に希釈放出し、適宜新しい冷却水と入れ換える。
- (3) イオン交換樹脂は保管するか、再利用する時は汚染除去の必要がある。

中性子を発生するターゲットおよびターゲット冷却水中に生成される放射能強度に関しては、SNS(ラザフォード)と TRIUMF のデータがある。SNS の場合、陽子エネルギー 800 MeV、平均電流 200 μ A で、U

第3表 U(²³⁸U)ターゲットと冷却水中の放射能(SNS)⁽⁵⁷⁾

ターゲット全放射能(6ヵ月間照射後)	
1日冷却後	190 kCi
1月冷却後	27 kCi
1年冷却後	2.7 kCi
冷却水中放射能	
短寿命核種(¹¹ C, ¹³ N, ¹⁵ O 他)	500 Ci
トリチウム(2年間)	35 Ci
⁷ Be	59 Ci

SNS は ISIS の旧称。1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq.

ターゲットに対し第3表のような生成放射能になっている。この数値からみてターゲットとその冷却水の取扱いは充分な注意が必要である。

加速器構造物や遮蔽材などではできるだけ放射化の少ない材質を選ぶべきであろうし、また耐放射線性のものにすべきであろう。加速器のダクトなどはAlが良いだろうし、コンクリートもNa含有量の少ない石灰岩(CaCO₃)を骨材とするものがよいだろう。核融合炉の分野では低放射化材料の開発研究が盛んに行われており、加速器の分野でもこの研究が必要である。

マグネットのハンドリングに関してはTRIUMFの報告⁽⁶⁸⁾に次のことが述べられている。

- (1) 真鍮やセラミックスのスペーサーを用いてアルミナ絶縁材を吹き付け、有機絶縁材を用いない設計にする。
- (2) マグネット全体をスチールとコンクリート遮蔽の下に埋め込み、近接できない構造にする。
- (3) 水や電源の接続はquick disconnect typeで、磁石がおかれると自動的に接続できるか、遠隔操作できるものにする。
- (4) マグネットは移動可能で交換の容易なものとする。
- (5) 人が近づかずに保守できるリフト装置を設ける。
- (6) 冷却水系は水流の方向が変えられ、逆洗浄用の化学溶液がまわるものにする。

このような大強度加速器の設計に当っては

- (1) 低放射化材料、耐放射線材料の開発
- (2) 遠隔操作システム、保守の容易な構造
- (3) ロボットの導入

というようなことを並行して進めることが重要であろう。

(東北大・中村尚司)

V. あとがき

当委員会において検討された事項を中心にまとめた報告を分担して執筆した。執筆された方々以外の委員の方々も種々の話題の提供や議論を深める上で大いに貢献して頂いていることを強調したい。

本稿で述べられているように、加速器の工学的応用は大きな可能性を持っており、原子力分野における加速器およびビーム技術の重要性は今後ますます大きくなると予想される。当委員会は1987年9月をもって終了したが、再び時宜を得て新しい委員会が発足することを期待する。

途中、塚田甲子男主査の急逝という不幸もあった

が、無事委員会活動を継続できたのは、委員、講師その他の方々のご協力に負うところが大きい。心からの謝意を呈する次第である。(原研・中原康明)

— 参考文献 —

- (1) 原子力学会「中性子ターゲットシステム」研究専門委員会：原子力誌，25(5)，344 (1983)。
- (2) 同上：“スプレション中性子工学”，(1984)，原子力学会。
- (3) 佐藤 勇：Proc. 6th Symp. Accelerator Sci. and Technol., 1987, Tokyo, p.98 (1987)。
- (4) HANSBOROUGH, H.: LA-8880, (1981)。
- (5) KFA Jülich: SNQ Project Proposal for a Spallation Neutron Source, (1984)。
- (6) ARMSTRONG, D.D.: IEEE Trans. Nucl. Sci., 30, 2965 (1983)。
- (7) 原子力委員会：原子力開発利用長期計画，(1987)。
- (8) 平尾泰男：月刊フィジクス，5，678 (1984)。
- (9) NISHIKAWA, T., HORIKOSHI, G.: IEEE, NS-30, 1983 (1983)。
- (10) WINICK, H.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A251, 177 (1986)。
- (11) FEAL, R.B. (ed.): The Stanford Two-Mile Acc., (1968)。
- (12) REES, J.: Proc. 1986 Linac Conf., p.209, SLAC-303, (1986)。
- (13) SCHOPPER, H.: IEEE, NS-32, 1561 (1985)。
- (14) WILK, B.H.: ibid., 1587。
- (15) LIMON, P.: ibid., 3447。
- (16) 高田耕治：文献(3)，p.69。
- (17) Physics Today, Aug., 50 (1987)。
- (18) 東北大核理研：施設拡充計画，(1981)。
- (19) LEEMAN, C.W.: 文献(2)，p.194。
- (20) Mosnier, A., et al.: Saclay proposal。
- (21) DEACON, D.A.G., et al.: Phys. Rev. Lett., 38, 892 (1977)。
- (22) EDIGHOFFER, J., et al.: 9th Int. FEL Conf., B1 (1987)。
- (23) BENSON, S.V.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A250, 39 (1986)。
- (24) ELIAS, L.R., et al.: Phys. Rev. Lett., 57, 424 (1986)。
- (25) 伊藤泰男：私信。
- (26) JOHNSON, J.O., GABRIEL, T.A., BARTINE, D.E.: ORNL/TM-8999, (1986)。
- (27) 橋倉宏行，松本純一，近藤駿介：原子力学会「昭61分科会予稿集」，F31，(1986)。
- (28) ISHIKAWA, Y., the KENS group: Proc. ICANS-Ⅷ, p.17 (1985)。
- (29) 文献(5)。
- (30) KLEY, W., BISHOP, G.R.: EURAC; The JRC Proposal for a European Fusion Reactor Materials Test and Development Facility, JRC-Ispra, (1985)。
- (31) HARMS, A.A., Lang, T.N.: Emerging Nucl. Energ. System, p.227, World Sci. (1987)。
- (32) INOUE, M., et al.: ibid., p.70。
- (33) FURUKAWA, K.: Atomkern./Kerntech., 44, 42 (1984)。
- (34) IKUTA, K., FURUKAWA, K.: Proc. Joint Int. Sym. Molten Salts, Honolulu, 1987, 87-7, 906 (1987)。
- (35) GRAND, P., TAKAHASHI, H.: Nucl. Instrum. Methods

- Phys. Res.*, B10/11, 454 (1985).
- (36) FURUKAWA, K.: "Alternative Energy Source VII", Vol. 3, p.341, p.353 (1987), Hemisphere Publ.
- (37) FURUKAWA, K., et al.: 文献(3), p.235; 文献(4), p.896.
- (38) HARMS, A.A., HEINDLER, M.: "Nuclear Energy Synergetics", (1982), Prenum; 「核エネルギー協働システム概論, (古川和男訳)」, (1986), 培風館.
- (39) 日本原子力産業会議: 核分裂生成物等総合対策懇談会報告書, (1973).
- (40) SCHNEIDER, K.J., PLATT, A.M. (ed.): High-level radioactive waste management alternatives, BNWL-1900, (1974).
- (41) 高橋 博: 原子力誌, 23[7], 500 (1981).
- (42) 小寺正俊: 同上, 26[6], 474 (1984).
- (43) TAKAHASHI, H., MIZOO, N.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 16[8], 613 (1979).
- (44) 松本高明: 原子力学会「昭62年会要旨集」, C41, (1987).
- (45) 松本高明, 植松邦彦: 原子力工業, 33[3], 39 (1987).
- (46) MURATA, H., MUKAIYAMA, T.: *Atomkern./Kern-techn.*, 45, 23 (1984).
- (47) 中原康明, 西田雄彦: 炉物理の研究, No 36, 20 (1987).
- (48) 西田雄彦, 中原康明, 筒井恒夫: *JAERI-M* 86-116, (1986).
- (49) NISHIDA, T., NAKAHARA, Y.: *Kerntech.*, 50, 193 (1987).
- (50) D'AURIA, J.M., et al.: *Phys. Rev. C*, 30, 236(1984).
- (51) LOZHNIK, O.V., YAKOVLEV, Yu, P.: *RI*-169, (1983).
- (52) ARAI, M., KIYANAGI, Y., WATANABE, M., NAKAHARA, Y., NISHIDA, T.: *KENS Report-VII*, p.263 (1986).
- (53) 鬼柳善明, 新井正敏, 渡辺 昇: 北大工研究報告, (印刷中).
- (54) 中原康明, 筒井恒夫: *JAERI-M* 82-198, (1982).
- (55) GRAY, A.G.: *Jül-Conf-45*, p. A5 (1981).
- (56) WOODS, R.: *ibid.*, p. A1a.
- (57) ATCHISON, F.: *RL*-81-006, (1984).
- (58) BURGERJON, J.J., et al.: *TRI-PP-79-39*, (1979).

〔付 録〕 用語解説

RFQ: ビームの進行方向と直交する正負の電場を4個の電極で形成し(Quadrupole), ビームの集束を行う静電レンズがある。この電場を高周波(RF)で与え, また電極間隔をビームの進行方向に変調することにより, 集束と加速を同時に実現させる構造をRFQ リニアックという。

ハドロン計画(大型ハドロン計画): 東大核研を母体として原子核研究の次代を担うべき研究施設として立案されている計画。前段 3 GeV, 後段 30 GeV の

シンクロトロンにより, 大強度陽子や重イオンを加速して得られる1次粒子や2次粒子(π, μ, K, n , 不安定核)を用いて原子核や物質の新たな研究を展開しようとするもの。大型ハドロン計画については本文のⅢ.3.(1)を参照のこと。

実効シャントインピーダンス: 加速構造の優秀さの指標で, 次式のZに相当する。 $P=E^2/Z$ (P: 加速器の単位長当りのエネルギー損失, E: 加速器の単位長当りの単位電荷粒子のエネルギー増加)。Zが大きいほど損失Pが少なくて済む。

Kilpatrick 限界: 1950年初めに米国で核燃料増殖用その他リニアック計画が進められた際に, 加速電極の放電限界を予測するための多数の実験が実施された。それらのデータを Kilpatrick が実験式にまとめ, 1953年に発表した。この式で与えられる放電限界を Kilpatrick 限界と呼び, 以後の加速器計画の設計指標となっている。真空および表面仕上げ技術が向上したので, 現在ではこの限界値の2倍近い電場の実現が可能となっている。

cw: pulsed に対比して用いられる用語で, continuous wave の略。

FMIT: Fusion Material Irradiation Test Facility の略。米国を中心とした核融合炉材料照射試験用加速器計画であるが, 採択されないまま棚上げになっている。

Emittance: ビーム軌道の任意の位置の断面内の粒子の位置とその進行方向の軌道に対する傾きを直角座標としてプロットすると, その集合の形状は軌道の上流, 下流で異なるが, 面積は不変である。これをエミッタンスという。

Acceptance: 加速器が受け入れ得るエミッタンスの最大値。

マイクロトロン: 電子をリニアックで積極的に多数回加速する方法としてビームをリニアックの入口に戻す方法がある。均一磁場の電磁石を用いてビームを数10回周回させるのがマイクロトロンである。

FEL: Free Electron Laser の略。自由電子レーザー。真空中の高速度電子ビームを空間的変動磁界を通過させることにより光を誘導放出させるレーザーのこと。

μ SR: Muon Spin Rotation の略。スピン偏極したミュー中間子を用いて局所磁場によるスピン回転やスピン緩和現象を観測することにより物質の研究を行う方法。

'88新テクノロジーシンポジウム Part 8 最新の蓄熱と昇温・熱交換技術の開発と実例

主催 日本能率協会, 協賛 本会ほか22学協会
会期 昭和63年1月26日(火)~29日(金)
会場 自治労第2会館(東京都千代田区)

開催主旨 省エネ関連産業が当面する課題につき, 幅広く関係者の参加を得て, 実践的な発表・ディスカッションを展開し, 情報交流を行い問題解決の糸口を探るとともに, 将来の方向性を見出すことを狙いとする。

問合せ先 新テクノロジーシンポジウム事務局 日本能率協会内
(03-434-6211, 内線2374)