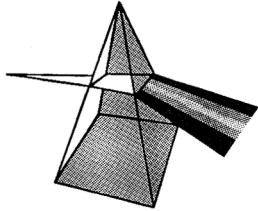


【技術報告】



大電流電子線加速器の性能確認試験

長谷川 信 遠山 伸一 野村 昌弘
田中 拓 武井 早憲 平野耕一郎
山崎 良雄

大洗工学センター システム技術開発部

資料番号：9-4

Performance of High Power CW Electron Linear Accelerator

Makoto HASEGAWA Shinichi TOYAMA Masahiro NOMURA
Hiroshi TANAKA Hayanori TAKEI Koichiro HIRANO
Yoshio YAMAZAKI

System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

オメガ計画の一環として、サイクル機構では長寿命核分裂生成物を電子線加速器により消滅処理する可能性を探る研究を1989年から進めてきた。消滅処理研究に必要な加速器の要件は、大電流の電子線加速であり、この大電流化技術の開発のために、加速エネルギー10MeV、平均電流20mA（ビーム出力200kW）の大電流電子線加速器を設計・製作し、その性能確認のための試験を実施した。

その結果、まだ開発途中であり長時間・安定動作の確認には至っていないが、ビーム出力約14kWを達成した。また、短時間ではあるが、ビーム出力約40kWの運転も可能とした。本稿では、加速器の性能確認試験で得られた成果を中心に述べる。

The OMEGA project required high-current electron beams to transmute fission products with gamma rays. The Japan Nuclear Cycle Development Institute was developing the basic technologies required to construct a 20mA-10MeV (200kW of output power) linear accelerator capable of accelerating a high-current beam in an efficient and stable manner.

The design of the accelerator began in 1989 and fabrication of the principal components was completed in March 1997. During testing of the accelerator, between January and December, 1999, an output power of approximately 14kW and a transient peak of 40kW were achieved.

This report presents the design, construction and performance of the accelerator.

キーワード

オメガ計画, 核分裂生成物, 消滅処理, 大電流電子線加速器, 性能確認試験

OMEGA project, Fission Products, Transmutation, High power Electron Linac, Beam Test



長谷川 信



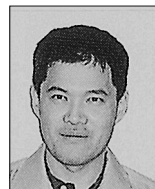
遠山 伸一



野村 昌弘



田中 拓



武井 早憲



平野耕一郎



山崎 良雄

1. はじめに

1.1 開発の背景

(1) 核種分離・消滅処理技術開発計画の概要

再処理から発生する高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命放射性核種は、壊変して十分に減衰するまで、長期にわたって人類の生活環境から隔離することが必要である。このために、現在ガラス固化して深地層に処分する技術開発が進められている。我が国でも高レベル放射性廃棄物を安定な形態に固化した後、約30年から50年間冷却貯蔵し、地下数百メートルより深い地層に処分することを基本方針としている。

一方、高レベル放射性廃棄物から有用な核種を分離して各々適切な用途に利用するとともに、長寿命のマイナーアクチニド核種及び核分裂生成物等を原子炉や加速器を用いて安定核種に変える可能性を探る核種分離・消滅処理研究は、資源の有効利用、処分の効率化等の観点から極めて重要な基礎研究と位置付けられている。この研究はオメガ(OMEGA:Option Making Extra Gains of Actinides and Fission Products)計画と名付けられ、国際協力のもと、長期的視野に立った研究開発計画に基づき推進されている。サイクル機構(旧動力炉・核燃料開発事業団)は、1988年から国の原子力政策の一環として、日本原子力研究所及び電力中央研究所とともに、基礎的な研究開発を進めてきた¹⁾。

特に、高レベル放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物のうち、セシウム、ストロンチウム等は、

中性子反応断面積が小さく、原子炉で消滅することが困難である。このため、サイクル機構では電子線加速器を用いて発生させたγ線の光核反応により消滅させる可能性を探究してきた。

本研究には、ガラス固化体からの発熱量の低減、処分後約1000年までの潜在的な放射性毒性リスクの低減、将来的な地層処分の効率化等に期待が掛けられている。

(2) 加速器による消滅処理研究の動向

消滅処理研究の対象となる主な核種は表1に示すとおりである。ここでは、半減期が10年以上でかつ軽水炉中での生成量が比較的多いものを検討の対象としている。また、原子炉における消滅処理の容易さを示す尺度として、中性子反応断面積も示してある。

マイナーアクチニド核種の消滅に関しては、原子炉を利用することが一般的に有利と考えられている。これはマイナーアクチニド核種に多くの核分裂性核種が含まれており、マイナーアクチニド核種を添加した燃料を原子炉に装荷することにより、燃焼しつつ消滅する方法が合理的と考えられるためである。

これに対して、大部分の長寿命の核分裂生成物は中性子反応断面積が小さいため、通常の原子炉での消滅は非常に困難である。このため、加速器等によりこれらを消滅する可能性が各国で検討されてきており、電子線加速器又は陽子加速器を単独に利用する方法、加速器と未臨界炉を組み合わせたハイブリッド方式による方法等が提案されてきた。

電子線加速器を用いた消滅処理は、高エネルギーの電子線を直接対象核種又はタングステン金属等のターゲットに衝突させ、その際、制動放射により発生するγ線を利用して、光核反応により短寿命核種又は安定核種に変換する方法である。

我が国の消滅処理研究は、サイクル機構が電子線加速器を用いた消滅処理研究を担当しその理論的な研究及び大電流電子線加速器の開発^{1, 2)}を、また、日本原子力研究所が陽子加速器を用いた消滅処理研究を担当し陽子加速器と未臨界炉のハイブリッドシステムの概念検討及び大電流陽子加速器の開発をそれぞれ進めてきた。

しかしながら、加速器を用いた消滅処理研究はまだ端緒についたばかりであり、今後核データ等の整備、システム概念の検討、大電流加速器の開発等を順次進めていく必要がある。

表1 主な消滅処理研究対象核種

核種	半減期 (年)	中性子反応 断面積 * (b)	生成量** (Ci/年) (kg/年)
MA			
²³⁷ Np	2.1×10 ⁶	181 (1.6)	11 14.4
²⁴¹ Am	432	603 (1.3)	5.0×10 ³ 1.46
²⁴³ Am	7380	79 (1.1)	601 3.03
²⁴³ Cm	28.5	720 (2.0)	55 0.01
²⁴⁴ Cm	18	15 (2.0)	5.8×10 ⁴ 0.72
²⁴⁵ Cm	8500	2347 (1.6)	4.1×10 ³ 0.03
FP			
⁹⁰ Sr	29	0.015 ◆	2.5×10 ⁶ 17.8
⁹³ Zr	1.5×10 ⁶	2.6	61 24.0
⁹⁹ Tc	2.1×10 ⁵	22.9 ◆	433 25.5
¹⁰⁷ Pd	6.5×10 ⁶	1.8	3.6 7.0
¹²⁹ I	1.6×10 ⁷	30.3 ◆	1 5.8
¹³⁵ Cs	2.3×10 ⁶	8.3 ◆	13.5 11.7
¹³⁷ Cs	30	0.25 ◆	3.5×10 ⁶ 39.5
¹⁵¹ Sm	90	15000	1.1×10 ⁴ 0.4

* MAについては、熱中性子に対する(n, γ)と(n, f)反応断面積の和、括弧内には1MeV中性子に対する(n, f)反応断面積を注した。

** 出力1GWaの軽水炉の年間生成量

◆ JNC測定データ

1.2 開発の目標及び課題

(1) 開発目標の設定

光核反応による将来の消滅処理プラントには、アンペア級の電子線加速器が必要とされている²⁾。しかし、一挙にこのような大電流の電子線加速器を実現するには課題が多いため段階的に開発を進める必要がある。そこで、加速器の大電流化の要素技術を開発することに当面重点をおいて、図1に示すように、エネルギーは10MeV、最大電流値は100mA（平均電流値20mA）を目標値とした²⁾。この目標値は、エネルギー10MeVまでの加速技術が確立すれば100MeVの達成は比較的容易であること、また、最大電流100mAを達成できれば現在の加速器要素技術のレベルから先を見通せる可能性が高く、将来アンペア級にスケールアップできるかどうか判断するのに適切な値であることから設定された。

(2) 開発課題

電子線加速器の大電流化に当たっての基本的な技術課題は、大電流低エミッタンス電子銃の開発、ビーム発散防止対策、ビームローディング（加速器に供給する高周波とビーム電流の相互作用）による加速管温度の制御方法等を挙げることができる。さらに、これらの課題は相互に関連しているため、これまでの高エネルギー化に向けた加速器

開発とは異なり、電子ビームの安定性、加速管からの熱除去及び加速器の制御性が重要な開発課題となる。

このように、大電流電子線加速器を開発するためには、新たな技術課題を解決する必要があり、技術課題に対して設計研究を実施するとともに、加速器の主要な構成機器である加速管、クライストロン等についての試作及びその性能確認を実施してきた。特に、主要構成機器の性能試験については、高エネルギー物理学研究所（当時、現在は高エネルギー加速器開発機構）と共同でその確認試験を実施した²⁾。

(3) 開発する加速器の方式

大電流電子線加速器の開発においては、現状技術レベルをしのぐ大電流の電子ビームを加速、輸送する必要がある。これを実現するためには、ピーク電流を飛躍的に高めるか、又は通常のパルス動作加速器のデューティーファクター（ビームの加速時間／加速器の運転時間）を大幅に増大させるか、のいずれかの方策を採用する必要がある。前者は、電磁誘導を原理とした高効率のインダクションライナックに相当し、そのピーク電流は100万Aにも達するが、機器の保全のためには、その加速時間（パルス）をおおよそ50 ns以下にし、その繰返しも数10秒に1回と小さくする必要がある。このため、この方法による開発では大電流化への改良の余地が小さいと判断された。一方、マイクロ波を利用した高周波（RF：Radio Frequency）ライナックを用いれば原理的に100% デューティーの電子ビームの加速が可能であり、ビーム品質も優れているという特徴がある。このため、基本的な方針としては後者の方法を採用し、デューティーファクターを100%、すなわちCW（Continuous Wave, 連続波）動作を最終的な目標として、加速器の大電流化を図ることとした。なお、RFライナックのデューティーファクターの向上は目覚ましく、1950年代には0.01%程度であったものが1990年代には米国のCEABF等でCW電子加速器が出現している。

表2に本加速器に要求される基本仕様を示す。エネルギーは10 MeV に設定し、電流値を既存電流の電子線加速器よりも大きいピーク電流100mA、平均電流20mAとしている。平均電流20mAの電子ビームをRFライナックで加速した例はない。これを実現するためには、大電力高周波源の開発、高周波の壁損失による熱除去等の課題のほか、ビーム安定性の確保や効率の向上という重要な課題がある。

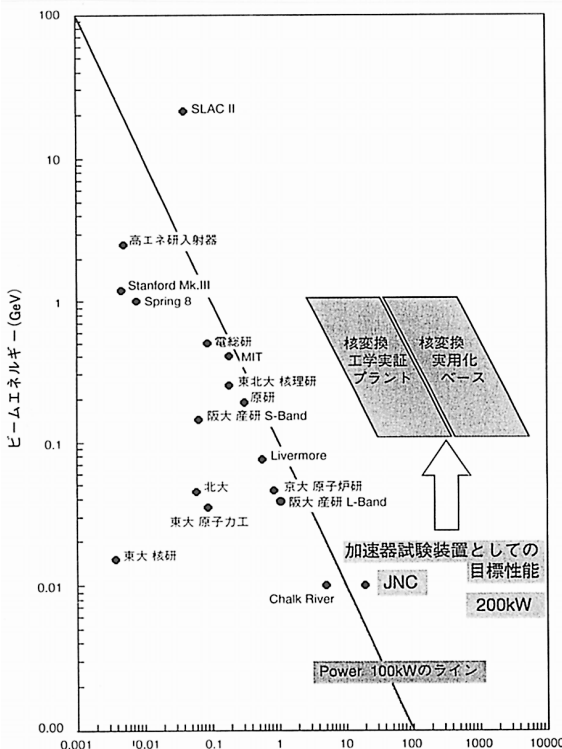


図1 世界の代表的電子線形加速器の性能比較

大電流電子ビームを加速させる装置構成として、大電力高周波源と加速管とを組み合わせる方法と中出力の高周波源と超電導加速管の組み合わせる方法が考えられる。一般的に、高エネルギーの電子ビームを得る装置構成としては前者が採用されている。この理由は、既存のクライストロンを使うことができるため新たな開発を必要としないこと、また、ビーム電流が小さいためビームローディング特性（ビーム電流変動に伴う加速管内エネルギーの負荷変動）が良好であることのためである。また、後者の方法と比較してヘリウム冷凍機を使用しないため、全体的なコストを安価に押さえることができる。さらに、本開発の目的である大電流電子ビーム加速では加速管の温度上昇による超電導状態の喪失（クエンチング）が生じやすく、超電導加速管を採用することは非常に難しい。このため本加速器としては、前者の大電力高周波源と加速管を組み合わせる方式を採用することとした。この装置構成は、単純で総合的な運転も容易であるという利点があり、大電流ライナックの高周波系として先例になると予想される。ただし、本加速器用の大出力高周波源としては、1.2 MWという世界最大級のクライストロンの開発が必要となる。

また、本加速器の高周波源は通常のライナックの約10倍以上となり導波管接合部等にも熱を発生させやすいため、製作に関しても細心の注意を払う必要がある。さらに、加速管の熱負荷は最大で加速管 1 本当たり約25 kWにも達するが、質のよいビームを得るためには運転中の加速管の内部温度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の精度で制御することが要求される。この制御方法の確立も、技術課題の一つとなる。

表 2 加速器の基本仕様

項 目	設 計 仕 様
電子エネルギー	10 MeV
最大電流	100 mA
平均電流	20 mA
パルス幅	4 ms
繰返し周波数	50 pps
デューティー	20 %
平均ビーム出力	200 kW

1.3 開発経緯

大電流電子線加速器の開発スケジュールを、表 3 に示す。

サイクル機構では、1990年度から高エネルギー物理学研究所、放射線医学総合研究所、大学等の協力を得て、電子線加速器の技術開発に着手した。1993年度からは大電流電子線加速器の製作を開始し、1995年12月には加速器の心臓部ともいえる入射部が完成、機器調整後1996年3月から9月までの間、入射部の性能試験を実施した。その結果、繰返し数が0.1 ppsではあるが、最大電流100 mA、パルス幅3 ms、エネルギー3.0 MeVという従来にない大電流で長パルスの電子ビームの加速に成功した。

また、1997年3月には本加速器のすべての主要設備が完成したが、東海事業所のアスファルト固化処理施設の火災爆発事故に端を発した安全総点検、安全対策工事等が行われ、実質的な設備・機器の調整試運転は1997年12月頃からとなった。また、これらの作業と並行して進めてきた許認可申請手続きにも影響を与え、施設検査も1998年12月と大幅に遅れることになった。

その間に動燃改革論議がなされ、1999年3月に策定したサイクル機構の中長期事業計画では、「加速器開発についても1999年度末までに研究を終了します。」とされ、消滅処理を目的とした加速器開発研究は、1999年度末で収束することとなった。

2. 各設備の概要

大電流電子線加速器は、主要設備として電子ビームを出射する電子銃、加速位相に同調した電子ビームを切り出す高周波チョッパー、チョッパーで切り出されたビームを位相方向に束ねるプリバンチャーとバンチャー、ビームをエネルギー10MeVまで加速する加速管、加速した電子ビームのエネルギーを吸収するビームダンプ、加速管に高周波を供給する高周波系から構成されている。さらに、これらの機器を制御する計測・制御系、機器を冷却する冷却水設備等の付帯設備がある。本加速器の基本構成を図2に、加速器の全景を写真1に示す。

以下、本加速器の設備のうち特徴的な事項について述べるが、詳細は文献³⁾を参照されたい。

2.1 電子銃

電子銃は、高周波チョッパーにエネルギー200keV、ピーク電流10～400mAの電子ビームを出射し、しかもエミッタンスを $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下に

表3 加速器開発の主な経緯

時 期		項 目
年	月	
1988年	10月	原子力委員会・放射性廃棄物対策専門部会が「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」を策定
1991年	3月	量子工学試験施設（建家）を着工
1992年	8月	量子工学試験施設（建家）が竣工
1994年	2月	加速器の要素機器の製作を開始
	9月	付帯設備の製作を開始
1995年	3月	入射部試験のための使用許可申請 入射部試験のための使用許可
	2月	加速器の入射部が完成 量子工学試験施設に管理区域を設定
1996年	3月	施設検査に合格 入射部試験を開始
	9月	長パルス（3ms）ビームの加速に成功 入射部試験を終了 使用廃止 量子工学試験施設の管理区域を解除
	3月	加速器（全体）が完成
1997年	10月	全体についての使用許可申請
1998年	1月	全体についての使用許可
	8月	使用許可（許可出力2kW）
	11月	量子工学試験施設に管理区域を設定
	12月	施設検査に合格
1999年	1月	本格運転を開始
	6月	出力2kWを達成
	8月	出力増強のための使用許可申請（出力105kW）
	9月	出力増強のための使用許可（出力105kW）
	10月	出力増強試験を開始
	12月	本格運転を終了

抑えるように電極の形状を最適化している⁴⁾。電子銃の電流制御方法としては、メッシュグリッド方式とアパーチャグリッド方式の二種類を採用した。前者はデューティーが低い場合に用いられ、

その特徴はビームのパルス特性がよく、また容易に電流が制御できる点である。一方、デューティーが高くなるにつれてメッシュが熱的に耐えられなくなるため、後者のグリッドを採用することになる。

また、本電子銃では真空を保ったままカソード寿命及びエミッタンスを測定できるように、カソード自身が回転できる縦型構造を採用している（写真2）。

2.2 高周波チョッパー

電子銃から引き出された電子ビームは、高周波チョッパーの空洞内の磁場により左右に振られ、加速位相に同調しない部分については高周波空洞より下流側に設置されたスリットで切り取られる。特に、エミッタンスの劣化を極力抑え、位相

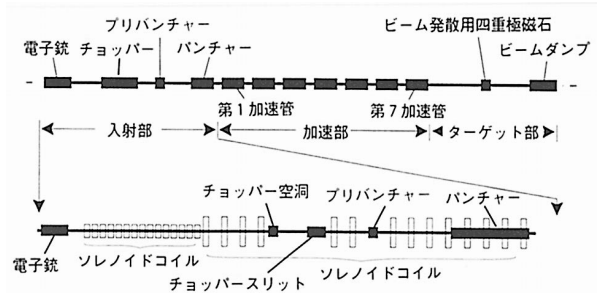


図2 加速器本体と入射部の基本構成

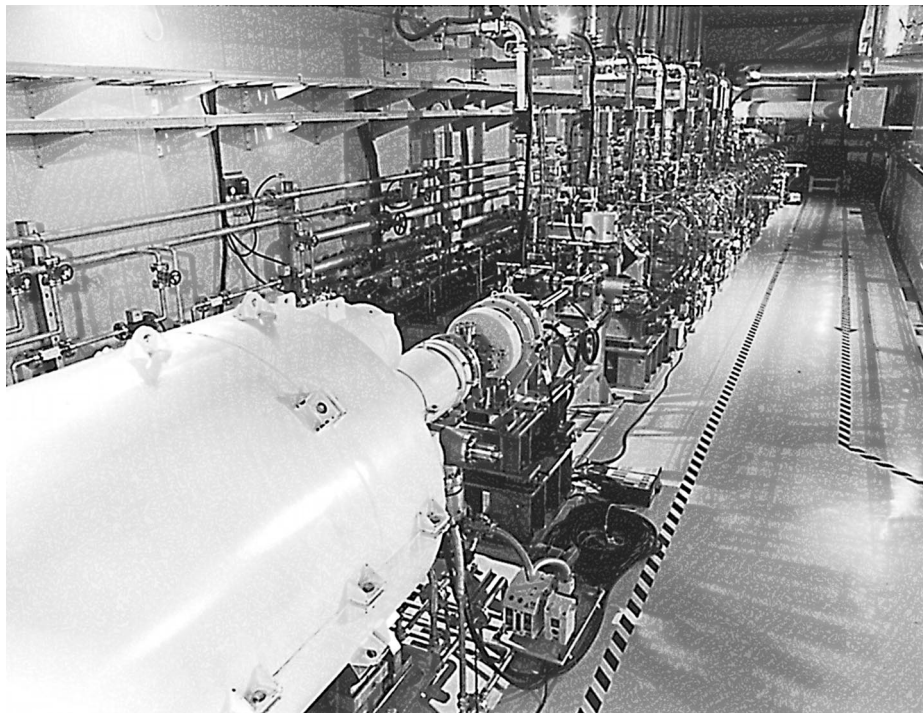


写真1 大電流電子線加速器の全景

角120°(直流電子ビームの3分の1)を切り出すために、高周波空洞に基本波、2倍高周波及び直流バイアスを加えた独自のアイデアに基づく高周波チョッパシステムを採用している⁴⁾。

2.3 進行波還流型加速管

加速管は無酸素銅を材質とする円筒形の導波管で、孔の開いた円板を周期的に並べた周期構造をしており、Lバンドの高周波で励起される定電界進行波還流型である(写真3)。この還流型は本加速管の特徴の一つであり、加速管に供給する高周波を還流させ、高周波エネルギーを蓄積させることにより、高周波の利用効率を高めている²⁾。また、加速管1本当たり約25kWの熱が発生するが、加速管の電氣的共振周波数を一定に保つため、冷却水温度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ に制御しながら、移相器で機械的に同調を行っている。

2.4 ビームダンプ

ビームダンプでは、加速器で得られるビーム出力200kWの電子ビームを吸収させるために、ビーム下流に向かって内径が小さくなるように中空金属円板を17枚並べ、四重極電磁石によって拡大され

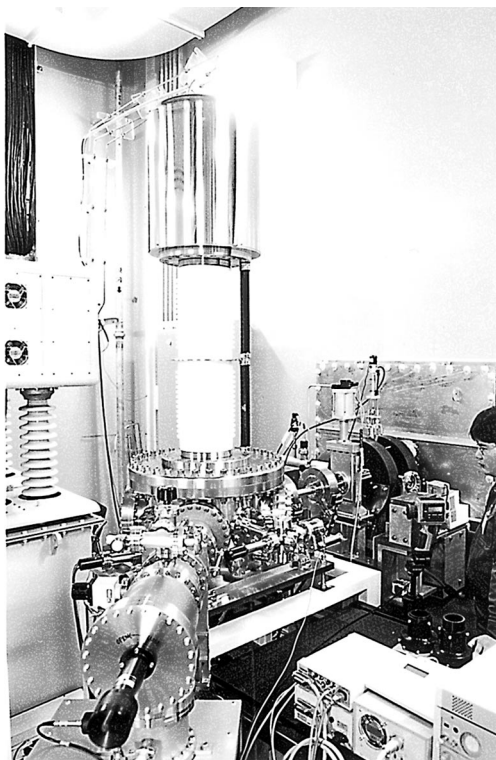


写真2 電子銃

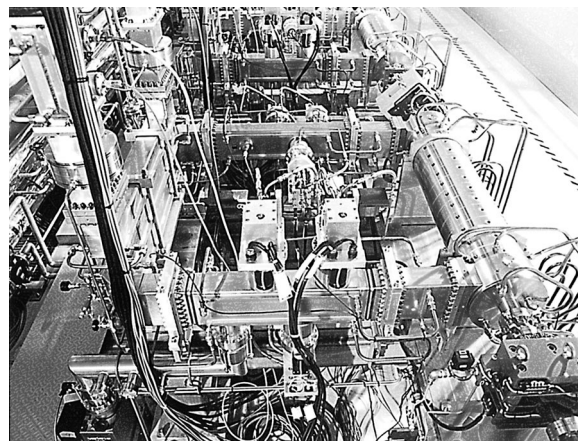


写真3 進行波還流型加速管

た電子ビームを金属円板内側に照射させる構造を採用した(写真4)。この中空金属円板の外側は、冷却水で冷却されている。

2.5 高周波系

高周波系は、チョッパ、プリバンチャー、バンチャー、加速管で使用する高周波を供給するクライストロン及びクライストロンに高電圧を印加する電源から構成されている。クライストロン(写真5)は、CW動作で最大1.2MWの高周波を出力できる性能を有しており、変換効率は65%程度にも達している²⁾。

なお、高周波の安定化は高周波を検波した後クライストロン入力にフィードバックする制御方法を採用しており、その精度は高周波電圧 $\pm 0.5\%$ 、位相 $\pm 1^{\circ}$ を目標としている。

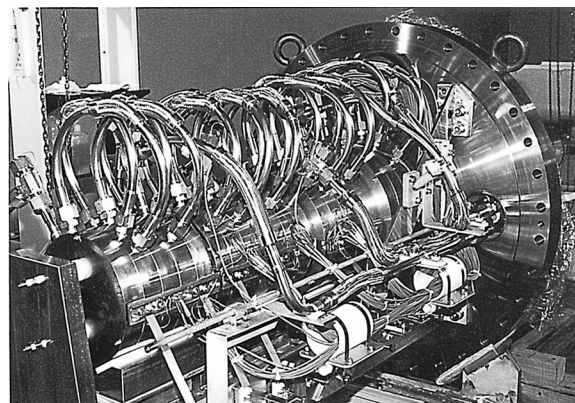


写真4 ビームダンプ(中空金属円板の外形)

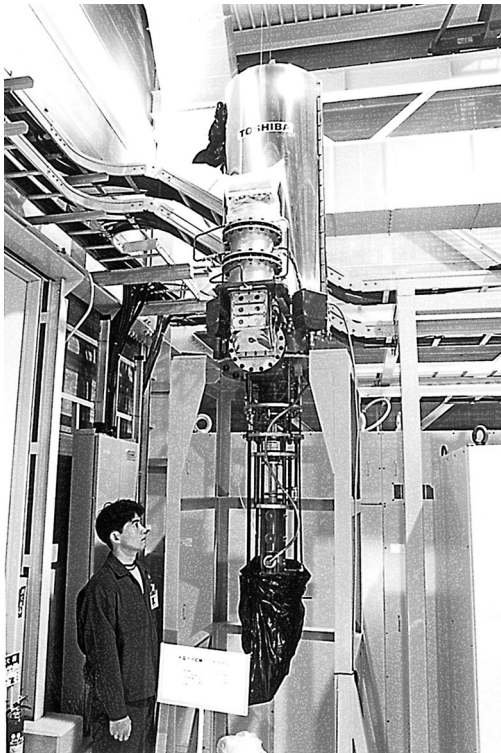


写真5 クライストロン

2.6 計測・制御系

計測・制御系は、ビーム輸送に必要な計測機器、ビームを制御する制御機器、及び計算機から構成されている⁴⁾。電子ビームを規定の軌道で輸送するために、ソレノイドコイル、ステアリングコイル及び四重極電磁石を用いて制御している。また、刻々と変化するビームの状態を把握するために、スクリーンモニター、位置モニター等の各種計測機器を設置している。

ビームを制御する計算機群には、ワークステーション、VME、DSP等を採用し、リアルタイムUNIXによる実時間制御機能を有している。計算機の基本ソフトウェアとして、NeXTSTEP、Real Time Unix及びParallel Cを採用した。運転員がワークステーション上に描き出されたビームの状態を見ながら、ステアリングコイル等の制御機器を操作できる構成としている。

3. ビーム試験の結果

本章では、加速器のビーム試験について1996年に実施した入射部試験、及び1999年の加速部試験について述べる。

3.1 入射部試験

(1) 初期ビーム調整

最初のビーム加速は高周波チョッパー及びプリバンチャーを動作させずに、非常に低いデューティ（パルス幅 $20\mu\text{s}$ 、繰返し 1pps ）で実施した。また、供給する高周波の位相についてもバンチャーと加速管との相対的位相のみを変化させる調整方法とした。この状態は設計どおりの条件ではないが、最初にビーム加速する場合には調整するパラメータが少なく、状況を観測するにはよい条件である。

(2) 高周波チョッパーの調整

高周波チョッパーは高周波空洞とスリットから構成されている。この高周波空洞では、基本波とその2倍高調波を同調させることにより、できるだけ電子ビームの横方向に余分な運動量を付加させないようにしている。空洞には2種類の可動スタブチューナーがあり、基本波に対しては TM_{210} モード、2倍高調波に対しては TM_{410} モードで同調が取れるように、事前に低いレベル（測定器からの高周波源）で測定したチューナー変化量に対する共振周波数の関係から、その位置を設定している。

まず、チョッパースリットを全開（ 40mm ）し、パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、 1pps 程度の低デューティビームを電子銃から入射して、チョッパースリット直後でプロファイルモニター（蛍光板）を観測した（図3）。各写真の下に描かれている図は、ビーム軸上に加わる磁場を示す波形である。また、その磁場により掃引された電子ビームの観測画像は、図中の各写真である。同図の①は空洞に高周波がない条件で、ビームスポットが存在している。これに基本波の高周波を加えると、図中の②のようにX軸方向に振られる。次に、基本波が作る磁場と同じ方向に直流磁場バイアスを加えると図中の③のようにX軸方向に振幅がシフトする。さらに、2倍高調波を印加し、位相を変化させて磁場波形にフラットトップを作ると、④のような画像となる。中心部の明るい部分が、磁場波形のフラットトップ部分で偏向磁場ゼロの部分である。この状態でスリットをビーム径（直径 8mm ）に狭めると、⑤のようにフラットトップ部分で、基本波に対して位相角 120° の部分が切り出される。

(3) プリバンチャーの調整

高周波チョッパー調整後、プリバンチャーのデチューニング（離調：電子ビームがある状態で同調させること）を行った。まず、ビームがない状態でプリバンチャー空洞に高周波 250W を供給し、 1249.135MHz で同調するようにプリバンチャ

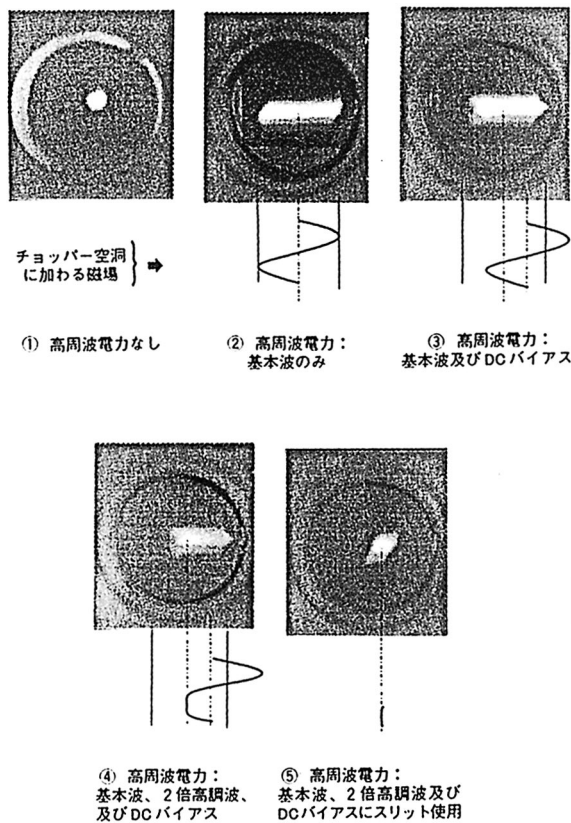


図3 チョッパーの動作

ーのスタブチューナーを調整する。次に、高周波チョッパーからピーク電流1mAの電子ビームをプリバンチャーに出射し、プリバンチャー空洞の移相器を用いて離調する位相角度を確認、固定する。ピーク電流を100mAまで増加させるとビームによる誘導電場によりプリバンチャー空洞の電場が変化するため、プリバンチャーのスタブチューナーにより、離調角を再度調整する。

(4) 還流型加速管の調整

はじめに、バンチャー、第一加速管還流部のチューニング及びマッチングを行う必要がある。還流部内の移相器により共振を取り（チューニング）、スタブチューナーにより還流部内の反射が最小になるよう調整する（マッチング）。ビーム幅1ms以下の条件では、電子ビームがある場合でも設定値は変わらず、反射も少ない。しかし、パルス幅が1msを超えると反射が大きくなるため、再度スタブチューナーを調整して反射を小さくし、移相器により共振を取り直す必要がある。

図4に高周波パルス幅4ms、ビームパルス幅3msにおける、ビーム加速時の還流部の高周波波形を示す。上から、還流部に供給される電力、還流

部内の順方向電力、還流部内の逆方向電力、ダミーロードに吸収される電力を表す。加速管に加わる電力（還流部順方向）はピーク電流100mAによるビームローディング（図中の凹部）のために電力が減少している。ビームローディングがない初めの部分では反射電力（還流部逆方向）が大きい、ビームローディング部分では反射が少なく、共振が取られていることが分かる。なお、ダミーロードの高周波電力は、ビームローディングがあるときに減少していることを示している。

還流部での反射率 $T=0.025$ （ビームローディングのあるとき）、 $T=0.03$ （ビームローディングのないとき）となっており、ビームローディングがある場合にはダミーロードに入る電力は非常に小さくなっている。これはピーク電流100mAに対して、還流部のカップリングが最適になるように設計されているためである。

(5) ビーム加速

以上のように各要素機器の調整を行った後、ビーム加速試験を実施した。電子銃から出た300mAの電子ビームを高周波チョッパーにより120°切り出し、100mAとなったビームをプリバンチャーによりバンチ（位相方向に束ねる）を行う。バンチャーと第一加速管のビームに対する位相の調整は、(4)の調整と同様に、相互の位相を変化させビームエネルギーが最大になる点を選んだ。

実際には、まずビーム幅を約30μs、繰返し0.1pps程度、ピーク電流10mAのパルスプロファイルモニター、位置モニター及び電流モニターで観測しながら、バンチャー、加速管の位相、集束コイル、ステアリングコイル等を調整してビームを順々に通過させた。その後ビーム幅を増加させながら最終的にピーク電流100mA、パルス幅3mA、繰返し0.1ppsまで加速することができた。

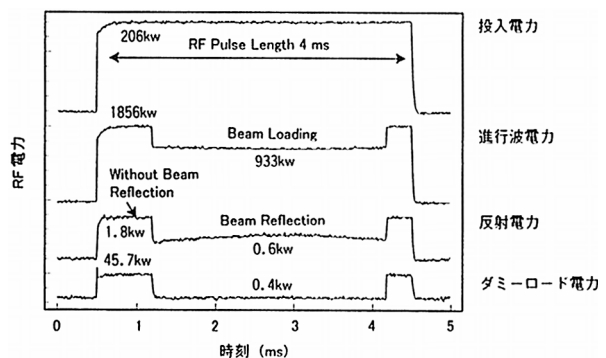


図4 入射部試験における還流部の高周波波形（高周波パルス幅4ms、ビームパルス幅3ms）

パルス幅が約30 μ s以上ではプロファイルモニターを使用できないため、電流モニター及び位置モニターによりビーム状態を確認した。図5に電流モニターで測定したピーク電流(100mA)、パルス幅3msの電流波形を示す。上段は電子銃直後のモニター波形(高周波チョッパーを通過していないためピーク電流は300mA)、中段は高周波チョッパー通過後、下段は第一加速管通過後で共に100mAのビーム電流である。

(6) エネルギー測定

加速された電子ビームのエネルギー分布は、最終加速管の下流部にある一部のビームパイプを測定装置に置き換え、磁場により曲げスリットを通過した電子ビームをファラデーカップで測定した。実際には磁場を変化させることにより、それに対応するビーム波形を求め、エネルギー分布を得た。エネルギー分布の測定例を図6に示す。エネルギー分布を精度よく測定するには電子ビームサイズや位置、分布等未知の部分を確認にすることがある。

3.2 加速部試験

(1) 概要

本試験では、許認可上許された範囲(繰返し35pps, パルス幅3ms, ピーク電流100mA)内で、現状の加速器システムを用いて、最大条件で電子ビームを加速し、大電流電子ビームの加速に関する諸課題を整理することが目的である。試験に先立って、第3.1項と同様の方法で機器調整を行った。まず、プロファイルモニターが使用できる繰返し1pps, パルス幅20 μ s, ピーク電流100mAの電子ビームを用いてその軌道を調整し、次に、繰返しを

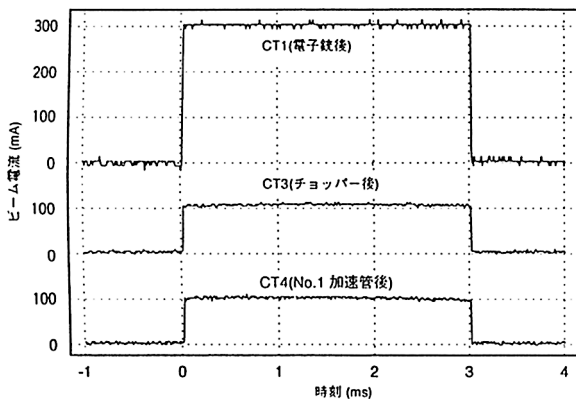


図5 電流モニターで測定した電流波形(パルス幅3ms, 入射部試験)

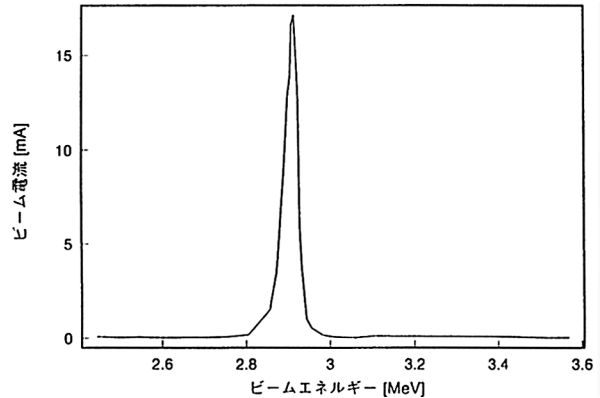


図6 入射部試験におけるエネルギー分布の測定例

1ppsから高周波と同じ35ppsまで上昇させた。その後、加速管内のパワー損失が一定になるようにビームと高周波の幅を同時に広げ、平均電流を上昇させた。加速管内のパワー損失を一定に保つ理由は、加速管の温度変化が還流部加速管の共鳴に影響を及ぼすためである。

パルス幅を1msまで広げ、平均電流3.5mAを加速したときの電流波形を図7に示す。電子銃出口から300mAの電子ビームを引き出した後、高周波チョッパーにより120°を切り出し、その後ビームダンプまでピーク電流100mAの電子ビームが設計値のとおり加速できていることを確認した。

その後、パルス幅を1.5msまで広げ大電流加速特有の問題点を探った。

(2) 問題点と解決案

大電流の電子ビームを加速した結果、以下に示す課題が明らかになった。本項では各課題に対応する解決案の検討結果を記載する。

1) チョッパースリットからの散乱電子によるプリバンチャー内での放電

チョッパースリットの形状や磁気シールドの影響により、設計値よりも大きなビーム径となり、さらにソレノイドコイルの作る中心軸上の磁場等が影響して、チョッパースリットから散乱される電子がプリバンチャーまで輸送されていることが分かった。この電子の量はパルス幅に比例して増えるため、パルス幅が1ms程度になったときプリバンチャー内での放電が発生することを確認した。

このような散乱電子がプリバンチャーに輸送されないためには、チョッパー空洞直前に磁場レンズ等を設置し、チョッパースリット上でのビーム径を小さくすることが考えられる。

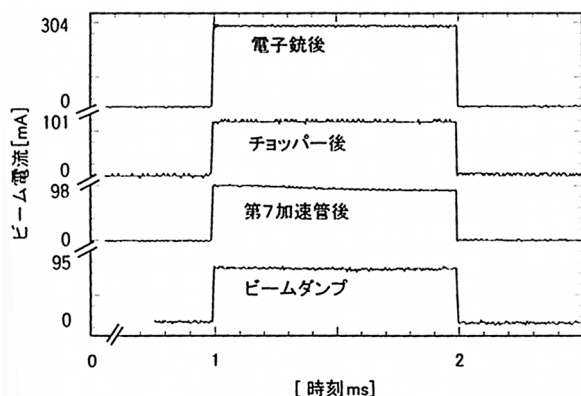


図7 加速部試験における電流波形（パルス幅1ms，平均ビーム電流3.5mA）

2) ビーム軌道の不安定性

ビーム軌道の不安定性を引き起こす原因として、漏れビーム等によるチャージアップ、高周波の不安定性、空洞の熱的不安定性等が考えられる。しかし本試験で電子ビームのデューティを下げ高周波による加速器の熱的負荷を高めた場合にはビーム軌道が安定していたため、ビーム軌道が変動する主な原因は、漏れビーム等によるチャージアップであると推測された。チャージアップ対策として、まずすべてのプロファイルモニター（誘電体）に金属メッシュを取り付け、次に第一加速管出口までの電流値モニターのセラミックス部分に金属筒を挿入した。この対策により第一加速管出口までのビーム軌道の安定性を確認した。第二加速管以降はビームダクトの構造上チャージアップ対策用金属筒を挿入することが困難な場所もあり、セラミックス部分に金属筒を挿入する以外の方法でチャージアップ対策を行う必要がある。

3) ビームダクトの発熱

パルス幅を広げ、電子ビームのデューティを上昇させるに従って、エネルギー分析用のビームダクト、電流モニターのセラミック部分など、特に、ビームダクト径の細い部分が発熱し始めた。温度上昇の原因はビームハロー（ビーム中心から外れたビーム）による発熱と考えられ、パルス幅を1.5ms程度（平均電流約5mA）まで広げたときエネルギー分析用ビームダクトの局所加熱により真空リークが発生した。ビームハローがビーム全体の1/1000程度と仮定した場合でも、5μAとなり通常の加速器の平均電流と同程度の値である。このように通常の加速器運転では問題にならない程度のビームハローでも大電流を加速する場合には大きな問題となることが判明した。

電流モニターの発熱を制御し、さらにチャージアップ対策を同時に行うためには、電流モニター部のビームダクト構造を変更することが考えられる。その一つの方法として、ビームハローの影響を受けないようにビームダクト径を大きくし、かつチャージアップ対策同様、金属筒を挿入することが考えられる。

4) ビームダンプ発散用四重極電磁石付近のビームダクトの発熱

ビームダンプでは、ダブレットの四重極電磁石を用いて電子ビームの径をいったん収束した後に広げ、ビームダンプの局所的な熱負荷を軽減する構造としている。ダブレットの四重極電磁石では、最初の電磁石で電子ビームのX方向を収束するがそれに伴ってY方向は発散状態になる。このため、発散したY方向が次の四重極電磁石により収束されるまでの間に、電子ビームが主としてY方向のビームダクトに当たり、ビームダクトの発熱につながると推測される。

ビームダクトの発熱を制御するためには、電子ビームの制御を行う四重極電磁石をダブレットからトリプレットに変更する等の対策が必要となる。

5) 電子ビームによるビームダンプからのガス放出による真空悪化

電子ビームによるビームダンプからのガス放出に関しては、最終段である第七加速管と間の真空コンダクタンスを小さくすることにより加速部には影響を及ぼさないような設計としていた。しかし、電子ビームによるガス放出が予想以上に多く、ビームダンプと第七加速管の間に排気速度340 l/sのターボ分子ポンプを追加しても、平均電流を約5mA以上に上昇させると第七加速管の還流部内の真空度を 10^{-5} Torrまで悪化させ、インターロックにより加速管還流部に設置したイオンポンプを停止させた。このため、今後の対策としては加速部の真空度を維持できる差動排気系の構築が必要である。

なお、放出ガスの成分を調べ予想との相違を明らかにすることは、今後の対策として非常に重要ではあったが、真空度が悪化した状態では四重極型質量分析計による分析もできなかった。

(3) 加速部試験のまとめ

今後、本加速器を用いて平均電流を更に高めていくためには、いかに高品質の電子ビームを作ることが重要な鍵である。特に、高品質のビームを得るために、ビームハローのように加速するにしたがい輸送されずこぼれ落ちる電子ビームをなくすることが必要である。そのためには、ビーム輸送系、

特に高周波チョッパー及びプリバンチャー周辺を再度見直す必要がある。例えば、今回バンチャー前に設置したコリメータのようにビームハローを直接測定できるモニターを設置し、ビーム輸送系を最適化し、こぼれ落ちるビームハローを最小限にすることである。

本試験により、平均電流を最大 5 mAまで加速し、通常の加速器では問題にならないような大電流加速器特有の問題を探り、その対策についてもある程度提案することができた。実際に、開発期間の制約から当初目標とした平均電流までは加速できなかったものの、多くの重要な結果が得られた。これらの結果は、最近様々な方面で計画されている加速器開発に反映され得るものと期待される。

4. おわりに

本加速器開発研究では、核種分離・消滅処理研究開発の一環として1989年からピーク電流100mA（平均電流20mA）、ビーム出力200 kWを目標として、消滅処理用電子線加速器の要素開発を推進してきた。電子線加速器は、高エネルギー物理学での利用や産業応用として整備されて、比較的技術基盤が充実されている加速器であるが、従来の加速エネルギーを高める開発方向に対して全く異なる世界でもユニークな開発を目指した。

まず、加速器の要素開発については、

- ① 進行波還流型の加速管による高効率化
- ② 世界最大級のCWクライストロンの開発
- ③ 独自アイデアに基づくチョッパースystem及び電子銃診断システムの採用
- ④ 大電流電子ビームを安全に吸収するビームダンプの開発

等を行い、機器単体で所定性能を確認するとともに加速器システムでもその機能を十分発揮し、試験に供することができた。

また、加速器の心臓部ともいえる入射部が1996

年に完成し、その性能試験では、繰返し数は0.1 ppsであったが、ピーク電流100mA、パルス幅3 msという従来にない大電流、長パルスの電子ビームの加速に成功した。

さらに、1997年3月には加速器施設全体が完成し、1999年1月より12月まで加速器のビーム試験を行った。一方、動燃改革論議から端を発した加速器開発研究の収束により、十分な開発期間が与えられなかったが、長時間・安定に至らないまでもビーム出力約14kW（平均電流 2 mA）を達成できた。また、短時間ではあるがビーム出力約40kW（平均電流 5 mA）の運転も可能となった。これらの試験結果を基に、大電流電子ビーム加速に関する特有な課題を整理し対策案を提示することで、大電流加速器の将来性を見極めることができた。

ここで得られた開発成果は、大電流・大出力化へ向かう加速器技術に対して、重要な技術情報として提供されるものと思われる。また、これらの成果が今後開発される加速器に対して、有効に活用されることが望まれる。

謝辞

本加速器の開発に当たり、豊富な経験に基づく有益なご助言及びご協力を賜った高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、関係した大学等の方々、特に、平尾泰男（東京大学）名誉教授、鳥塚賀治（東北大学）名誉教授、佐藤勇（日本大学）教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 若林利男, 山岡光明 他: “高速炉および加速器による核変換研究の現状”, 動燃技報, No.82, p.96~103 (1992).
- 2) 遠山伸一, 谷 賢: “大電流電子線形加速器の開発”, 動燃技報, No.88, p.19~28 (1993).
- 3) 野村昌弘, 遠山伸一 他: “大電流電子線加速器の開発” JNC TN9410 2000-007 (2000).
- 4) 江本 隆, 野村昌弘: “大電流CW電子線形加速器入射部の開発について”, 動燃技報, No.97, p.46~56 (1996).