



# 大電流電子線形加速器の開発

暹山 伸一 谷 賢

大洗工学センター技術開発部

資料番号: 88-1

Development of High Power CW Electron Linac

Shin-ichi Tōyama Satoshi Tani  
(Technology Development Division, O-arai Engineering Center)

オメガ計画の一環として、動燃事業団では長寿命核分裂生成物を加速器により消滅処理する可能性を検討している。将来の消滅処理システムで必要となる加速器の大電流化技術を開発することを目的として、大電流電子線形加速器を設計し、その構成要素であるクライストロン、加速管等の試作・評価を実施した。本加速器のエネルギーは10MeVであるが、最大/平均ビーム電流が100mA/20mAと既存の加速器に比べてきわめて高い点に特徴がある。試作機器による大電力試験の結果、全般的に良好な特性を示し、開発目標を達成できる見通しが得られた。本年度から加速器要素の本格的な製作を開始し、平成8年度にはすべての要素・機器の据付を終了する予定である。

## 1. はじめに

わが国では高レベル放射性廃棄物中に含まれるTRU核種（ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム等の超ウラン元素）および長寿命核分裂生成物（ストロンチウム、セシウム、テクネチウム、ヨウ素等）を分離し、これらを原子炉、加速器等により消滅する可能性を探る研究をオメガ計画として推進している。

オメガ計画は、昭和62年6月に改定された「原子力開発利用長期計画」を受けて、昭和63年10月に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会で策定されたものである。本計画は、科技庁バックエンド推進室の指導の下、動燃事業団、原研、電中研が中心となって、長期的・基礎的研究として推進している。

動燃事業団では、TRU核種の消滅には、高速炉を利用することが適切と考えており、そのための研究開発を実施している。一方、長寿命核分裂生成物については通常の原子炉で消滅するのが困難であることから、加速器等による消滅処理の可能性を検討している<sup>1)</sup>。

加速器等による消滅処理としては、電子加速器、陽子加速器を単独で用いる方法、加速器と未臨界炉を組み合わせる方法等が提案されている。このうち電子加速器による消滅処理は、加速器で得られる高

速の電子線を対象核種に直接、あるいはタングステンのようなターゲットに衝突させ、発生したガンマ線による $(\gamma, n)$ 反応を利用して短寿命核種または安定核種に変換するものである。図1にセシウム-137を消滅する場合を例に電子加速器による消滅処理の原理を示す。

電子加速器による消滅処理の特徴としては、 $(\gamma, n)$ 反応を用いるので副次的な放射能の発生が少ないこと、また、加速器技術としての基盤が高エネルギー物理学での利用や産業用として、陽子加速器に比べて整備され充実していることがあげられる。しかしながら、実際に原子炉内で生成する長寿命核種を消滅する場合を想定すると、従来にはない大電流の電子加速器が必要となる。

図2にセシウム-137を消滅する場合に必要な電

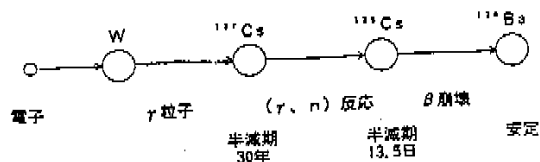


図1 電子加速器による消滅処理の原理  
(例:  $^{137}\text{Cs}$ の場合)

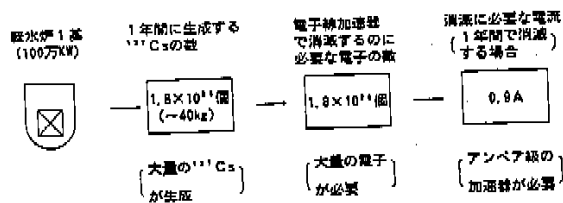


図2 消滅処理に必要な電流の計算例  
( $^{137}\text{Cs}$ の場合、変換率を100%と仮定)

流値の計算例を示す。100万kW級の軽水炉1基中で1年間に生成するセシウム-137を、電子加速器1基で1年間で消滅するのに必要な電流は消滅効率を理論上100%と仮定しても0.9Aとなり、少なくともアンペア級の大電流加速器が必要であることがわかる。一方、加速エネルギーとしては100MeV程度が必要と考えられる。これは消滅対象核種が何であっても、 $(\gamma, n)$ 反応のピークはガンマ線のエネルギーが10数MeV付近にあり、このエネルギーのガンマ線を効率良く発生させるには、電子線のエネルギーとしては100MeV程度必要であることによる。処理量の向上のためにはアンペア級の加速器を複数台用いてターゲットに照射することが考えられる。

図3に世界の代表的電子線形加速器を示す。従来の加速器開発は素粒子分野で新しい物理現象を発見することを目指して、加速エネルギーを高めることに重点が置かれており、すでにスタンフォード大学では30~50GeVクラスの電子加速器が稼働している。これに対して、将来の消滅処理システムで必要となる加速器には、前述のようにアンペア級の大電流が要求され、これまでの加速器開発の方向とは異なり、世界にも例のない性能を目標とするものである。

必要なエネルギーおよび電流を一挙に達成することは技術的にも予算的にも困難であるので、動燃事業団では当面、加速器の大電流化技術の開発に重点を置くこととして、エネルギー10MeV、最大/平均ビーム電流100mA/20mAを開発目標として設定した。エネルギーを10MeVに抑えたのは、これを超えると、空気の放射化が生じて加速器のメンテナンス等がやりにくくなる恐れがあること、10MeVまで加速する技術が確立すれば加速管を追加することにより100MeVの達成は比較的容易に見通せると考えられることによる。空気の放射化は10MeVでの運転経験を生かして、もれビームを極力へらすことにより低減する。最大ビーム電流を100mAとしたのは、現在の加速器要素・付帯設備技術レベルか

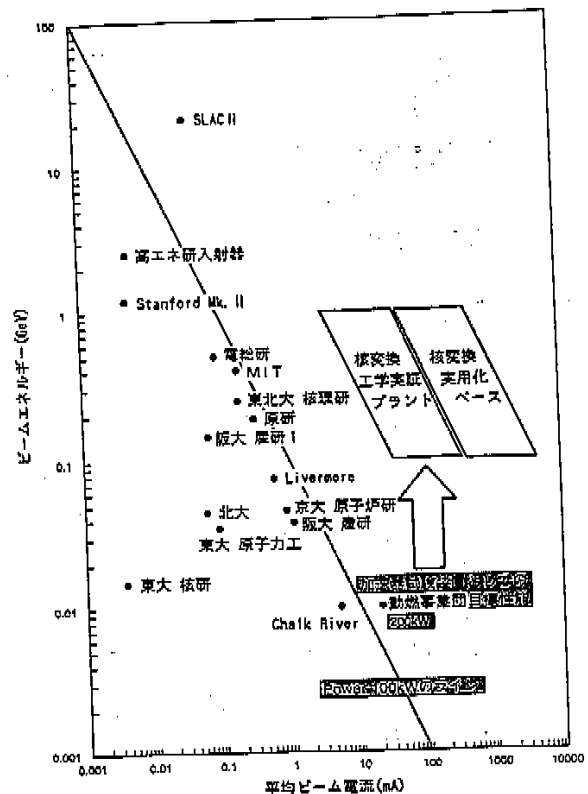


図3 世界の代表的電子線形加速器の性能比較

ら見て達成できる可能性が高いこと、将来アンペア級にスケールアップできるかどうかを判断するのに適切な値であることによる。

大電流化にあたっての基本的な技術課題としてはビーム発散の防止と加速管等の耐熱・除熱の問題が挙げられる。多数の電子が加速される場合、自らが形成した電場の影響によって、電子が軌道から発散する傾向が強くなる。この現象はBBU(Beam Break Up)と呼ばれており、大電流になればなるほどその防止対策が重要となる<sup>2)</sup>。また、大量の熱が発生するため、耐熱材料を用いたり、適切な除熱を行う必要がある。これらの具体的内容については、次章以降で記述する。

上述のように本加速器は世界にも例を見ない大電流電子線形加速器であるため、設計研究を行うのは勿論のこと、クライストロン、加速管等の主要構成要素については試作を行い、その性能を確認する必要がある。そのため、高エネルギー物理学研究所と共同で大電力試験等を実施している。本報では、加速器の特徴、設計の概要、現在までの試験結果および今後の予定について報告する。

## 2. 加速器の特徴

動燃事業団で開発している電子加速器は、前章でも述べたように現在の技術レベルをしのぐ大電流電子ビームを加速する必要がある。そのためには、通常のパルスライナックが持つデューティファクター（ビームの加速時間／加速器の運転時間）を大幅に増大するか、ビーム電流を飛躍的に高めるかのいずれかの方策をとることになる。後者は、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であり、そのピーク電流は100mAに達する<sup>3)</sup>。しかし、機器の保全のためそのビーム加速時間（パルス）は凡そ50ns以下であり、その繰り返し数は数10秒に1回と小さいため、大電流化への改良の余地は少ない。一方、マイクロ波を利用したRF (Radio Frequency) ライナックは、原理的に100%デューティの粒子加速器が可能であり、ビームの品質も優れている。このため、基本的な方針としては、デューティファクタ100%、すなわち、CW (Continuous Wave) を最終目標として、加速器の大電流化を図ることとした。

RFライナックのデューティファクターについては、表1に示すように、1950年代には0.01%程度であったものが、1990年代には米国のCEBAF等でCW電子加速器が出現しつつある。現在動燃事業団で開発を進めている加速器の基本仕様を表2に示す。エネルギーは10MeVに設定し、電流値を既存の電子線形加速器では最も高い最大100mA、平均20mAとした。平均で20mAの電子ビームをRFライナック

表2 加速器基本仕様

|           |       |                    |
|-----------|-------|--------------------|
| エネルギー     | (MeV) | 10                 |
| 最大ビーム電流   | (mA)  | 100                |
| 平均ビーム電流   | (mA)  | 20                 |
| エネルギー分散   |       | $5 \times 10^{-3}$ |
| パルス幅      | (ns)  | 4                  |
| 繰り返し数     | (Hz)  | 50                 |
| デューティ     | (%)   | 20                 |
| 平均ビーム出力   | (kW)  | 200                |
| 加速周波数     | (MHz) | 1249, 135          |
| マイクロ波長    | (cm)  | 24.0               |
| 加速モード     |       | $2\pi/3$           |
| 加速管の本数    |       | 8                  |
| 加速ユニット数   |       | 2                  |
| クライストロン数  |       | 2                  |
| クライストロン出力 | (MW)  | 1.2                |
| 加速器の全長    | (m)   | 18.0               |

で加速した例はなく、それを実現するためには、大電力RF源の開発、RFの壁損失による熱の除去等の課題がある。このほかにビーム安定性の確保や効率向上という重要な課題があるが、それは次章で述べる。

大電流を加速するためには、大電力RFを加速管に供給することが必要である。それには、中出力のRF源と超電導加速管の組合せまたは大出力RF源と常電導加速管の組合せが考えられる。高エネルギー加速器では一般に前者が採用されている。これは、既存のクライストロンを流用でき、ビーム電流が小さいので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）が良好であり、ヘリウム冷凍機のコストを考えても全体として安価であるためである。しかし、大電流では温度上昇による超電導状態の喪失が生じやすく、超電導加速管は使えないため、本加速器では後者を採用した。これは機器の構成が単純で、総合的な運転が容易であるという利点があり、今後、大強度ライナックのRF系として定着して行くものと思われる。ただし、本加速器用の大出力RF源として、1.2MWという世界最大級のクライストロンを開発する必要がある。

本加速器でのRFパワーは通常のライナックの10倍以上なので、導波管接合部等にも熱が発生しやすく細心の注意が必要である。また、加速管の熱負荷は最大で加速管1本あたり約20kWに達する。質の良いビームを得るためには、運転中の加速管内部の温度を±0.1℃の精度で制御する技術開発が必要である。

## 3. 設計の概要

## 3.1 ビームダイナミックス

本加速器の構成を図4に示す。加速器は入射部と加速部（レギュラー部）に分かれており、入射部は

表1 世界各地に設置された大電流電子ライナック

| RFライナック                    | 第二世代                   | 第三世代                     |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| 第一世代<br>数10μA<br>0.01%DF*  | 数100μA<br>0.1-1%DF     | 数100μA<br>100%DF         |
| 1950                       | 1960 1970              | 1980-90                  |
| オルセイ(仏)2.3GeV              | SLAC(米) 20GeV          | サクレ(仏) 730MeV            |
| スタンフォード(米)1.8GeV           | MIT(米) 700MeV          | NIRHEF(荷) 500MeV         |
|                            | MIT(米) 350MeV          | MIT(米) 1.8GeV            |
|                            | マインツ(独) 350MeV         | 東北大学(日) 300MeV           |
|                            | サスカチュン(加) 150MeV       | サスカチュン(加) 16GeV          |
|                            | NBS(米) 150MeV          | マインツ(独) 820MeV           |
|                            | グラスゴウ(英) 150MeV        | ダルムシュタット(独) 500MeV       |
|                            | チョークリバー(加) 10MeV       | 東北大学(日) 150MeV           |
| 国内のRF電子ライナック<br>名古屋(12MeV) | 阪大放射(15MeV)            | 電総研(35MeV)               |
|                            | 電総研(190MeV)            | 電総研(500MeV)              |
|                            | 東大放射(6MeV)             | 京大原子炉(25MeV)             |
|                            | 北大(45MeV)              | 高エネ研(2.5GeV)             |
|                            | 東北大(300MeV)            | 東大原研(35MeV)              |
|                            |                        | 阪大原研(30MeV)              |
| インダクションライナック**             |                        |                          |
| 1980                       | 1970                   | 1990                     |
| サンアディア研(米)<br>10MeV-400W   | 陸軍ハリー研(米) 10MeV-7kW    | リバモアATA(米)<br>50MeV-500W |
|                            | リバモアETA(米) 3.5MeV-600W | CESTA(仏)<br>20MeV-3kW    |
|                            |                        | 高エネ研(日)<br>1.6MeV-10W    |

\* デューティファクター：ビーム発生の実時間

\*\* インダクションライナックは数1000-100000Aの電子ビームを加速するがDFは0.0001%以下である。

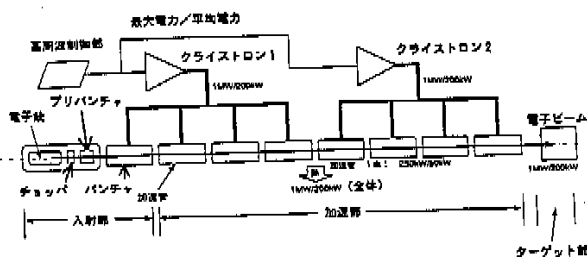


図4 大電流電子線形加速器の基本構成

電子銃、チョッパ、プリバンチャ、バンチャからなり、レギュラー部は7本の加速管からなる。ライナックのビーム品質は、電子が光速に加速される入射部の段階でほぼ決まるので、電子銃で安定度の高い電子を放出し、チョッパ、プリバンチャではビーム加速方向以外の横方向運動量を加えず、バンチャで電子をできるだけこぼさないように加速する。このため、電子銃には電子エネルギー200kVで1.0%以下の精度が要求される。

入射部でのビーム軌道計算の例を図5に示す。ここではビームはチョッパ(図5のA)で60°、プリバンチャ後(図5のB)で15°、バンチャ後(図5のC)で5°以内にパンチ(集群化)されている。バンチャに入る電子ビームパンチはRF位相で約60°の位相安定性領域に入って加速されるため、加速効率はや65%程度であるが、電子ビームが光速に達するレギュラー部では80%以上の効率で電子を加速できる。したがって、本加速器では、電源効率を通常の90%とすると、全体の効率は、加速効率×RF変換効率×電源効率 $=0.8 \times 0.65 \times 0.9 = 0.47$ となりほぼ50%の効率でビームを加速できる。これは、通常の

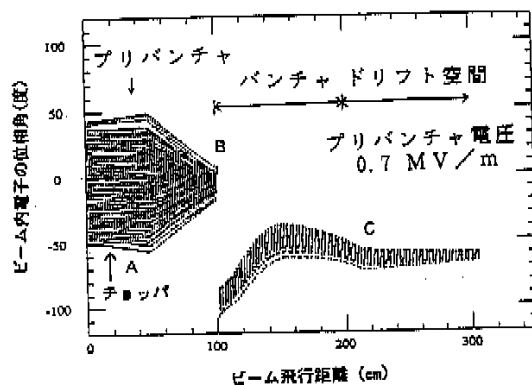


図5 入射部のビームダイナミクス

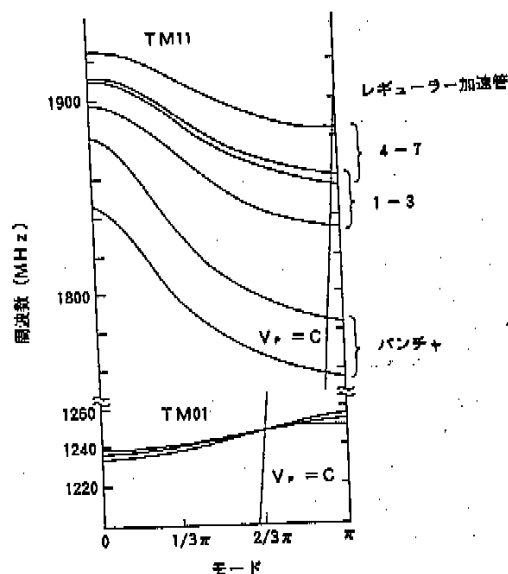


図6 BBU防止のための高周波モードの分離

RFライナックの効率に比べて2倍以上高い。

一般にライナックでは長さに応じてBBUが発生する可能性がある。ビームが基準軸上を運動する際にはBBUは原理的に生じないが、本加速器のように大強度の場合はビーム径が大きくなり易いので無視できない。BBUを防止するため、本加速器では以下の対策をとっている。①管内の高次のRFを可能な限り小さくするため、図6に示すように、共振周波数を加速管内空洞毎にずらし、管内で高次のRFが増大することを防止する。②加速管の利得(加速電界)を小さくし、かつ実効長を短くし、加速管の間にはビーム補正用の電磁石をつける。③特にビームが発散し易い入射部にはソレノイド磁場により、ビーム軌道をそろえる。

また、電子銃のエミッタンスを小さくすれば、BBUを防止するだけでなくビーム品質の向上という付加価値が期待できるので、そのための検討も行っている。現在までの解析では、 $50 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下のエミッタンスを得る可能性があり、これは自由電子レーザー等へのビーム利用の観点からも優れている。

以上のことは、一本の加速管に対してであり、縮退型BBUと呼ばれるものである。これに加えて、蓄積型BBUという加速管を多数配することによって生じるものがある。これは、一本の加速管でわずかにビームに残った変調成分が増幅されるもので、これを予防するため、本加速器では3段階において

表3 クライストロン仕様

| CW運転パラメータ              |  | アノード変調型            |
|------------------------|--|--------------------|
| 制御方式                   |  | 1245, 135          |
| 動作周波数 (MHz)            |  | 1, 2               |
| 飽和出力 (MW)              |  | 90                 |
| ビーム電圧 (kV)             |  | 25                 |
| ビーム電流 (A)              |  | $1 \times 10^{-5}$ |
| バービアンズ (AV-3/2)        |  | 6                  |
| 空洞数                    |  | 0, 8               |
| 最大コレクター損失 (MW)         |  | 蒸発冷却               |
| コレクター冷却方式              |  | 50                 |
| コレクター供給流量 ( $\ell/m$ ) |  | 65                 |
| 目標効率 (%)               |  | 50                 |
| 電力利得 (dB)              |  | 250                |
| ヒーター加熱電力 (W)           |  |                    |
| パルス運転パラメータ             |  |                    |
| 飽和出力 (MW)              |  | 4, 1               |
| ビーム電圧 (kV)             |  | 147                |
| パルス幅 ( $\mu s$ )       |  | 800                |
| 繰り返し周波数 (Hz)           |  | 50                 |
| デューティファクター (%)         |  | 4, 0               |

8本の加速管の空洞寸法を変え、かつ、各加速管の間の電磁石により、ビーム形状をコントロールしている。これらにより、凡そ150mAまでBBUは生じないことが計算により予測されている。

### 3.2 クライストロン

表3に、本加速器で使用されるクライストロンの仕様を示す。この特徴は、本加速器が所定の性能目標を達成した後に行う種々の実験の範囲を広げるために、CWとパルスの2つの運転モードを有することである。すなわちCWモードでは、1.2MWの大出力で大電流を加速し、パルスモードでは平均値は小さいが、最大で4.1MWを出力し、高エネルギー加速を行うものである。これは加速管内パワーが加速電界の2乗に比例するという関係を利用している。このため、クライストロンのビーム電圧は最大147kVに設定されている。効率は6段スタガー空洞を用いて65%という、Lバンド(1~2GHz)用としては世界トップクラスのものである。

また、本クライストロンは、コスト低減のために出力窓形式としてビルボックス型を採用している<sup>4)</sup>。これは同軸型に比べて、構造が単純で安価であるためである。ただし、窓材のセラミックに熱負荷がかかりやすいので設計には注意を要する。

本クライストロンの設計では、熱の問題以外に90kVと147kVの両モードでのビーム安定性を確保することが重要である。このため、147kVの電子ビームでも集束可能な磁界を発生できる構造としている。

### 3.3 レゾナントリング

本加速器の最大の特徴は電子加速に通常の進行波型、定在波型ではなく、進行波還流型加速管(レゾ

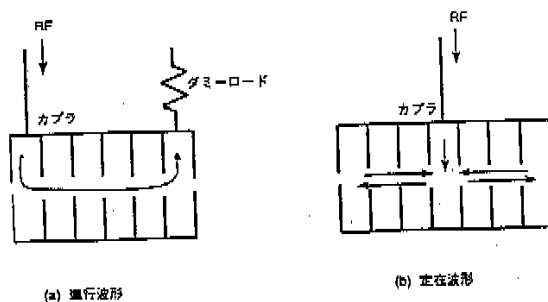


図7 加速管の原理

ナントリング) を用いていることである。

進行波型とは、図7(a)のように加速管に単純にRFを電子ビームと同じタイミングで通し、加速管の終端部でダミーロードに吸収させるもので、運転が容易であるが効率が悪いという欠点を有する。定在波型とは、図7(b)のように加速管内にRFを蓄積し、定在波を作ることから効率が良い。しかし、正確な共鳴を得るために、進行波管よりはるかに複雑な構造になり、また電力反射が生ずるとクライストロンを直撃し、破壊する可能性が高いこと等、運転時に注意を要する。

進行波還流型とは、これらの利点を集めたもので、構造的に簡単で、安全性にも優れたものである。レゾナントリングそのもののアイデアは古く、1950年代の後半に考案されており、その目的は小出力のクライストロンから実効的に大出力を得ることであった<sup>5)</sup>。本加速器で用いられるレゾナントリングの概要を図8に示す。レゾナントリングは進行波加速管、移相器、スタブチューナ、RF結合器、ダミーロードおよびそれらを結合する導波管か

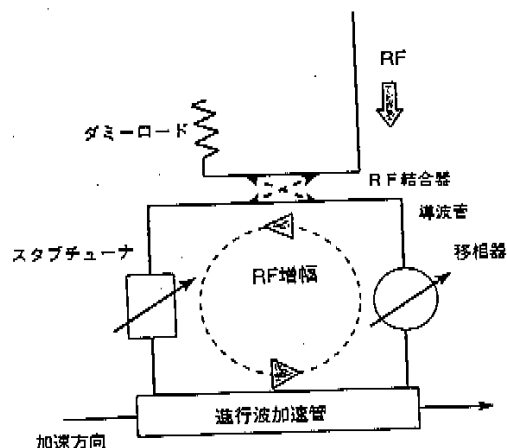


図8 レゾナントリング構成図

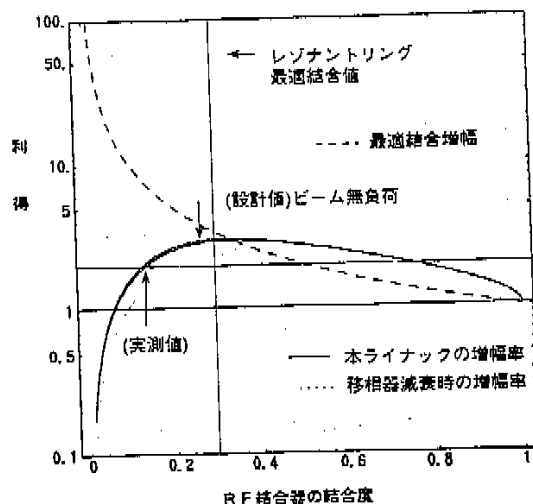


図9 レゾナントリング利得

らなる。レゾナントリングの利点は、加速管は進行波型というきわめて簡単な構造であり、RF特性の調整はすべて移相器とスタブチューナで行えるので、製作、メンテナンスが容易であることである。またレゾナントリングは、加速に用いられたRFを再利用するため、実効的に管内電力を高めることができる。

図9にRF結合器の結合度と、管内電力増幅度の関係を示す。これはレゾナントリングのRF減衰が0.95（ビーム無負荷時）の場合の計算である。レゾナントリングのRF減衰が、0.8以上であればレゾナントリング内では2倍以上の増幅があり、定在波型加速器よりも高い電力を得ることができる。本加速器の減衰は、ビームローディング時でも0.85なので、4倍の電力利得が得られる。しかし、同時にレゾナントリング自体の減衰が小さいことが要求される。導波管自体の減衰は0.001以下であり問題がないが、特に移相器等の挿入物による減衰を小さくする必要がある。このような機器配置による減衰や反射は電力増幅を著しく低下させるので、移相器、スタブチューナの調整や、レゾナントリングの温度調節が重要となる。

レゾナントリングは、電力利得だけでなく、効率の面でも優れている。図10に加速電流を変えた時の加速効率を示す。これでわかるように、本レゾナントリングは100mAで65%の効率をもち、さらに大電流では、RF結合器の結合度を変えることにより80%以上の効率を得ることができる。

進行波還流型加速管を本加速器のような大電力レベルで用いることは世界初であるので、未知の事項

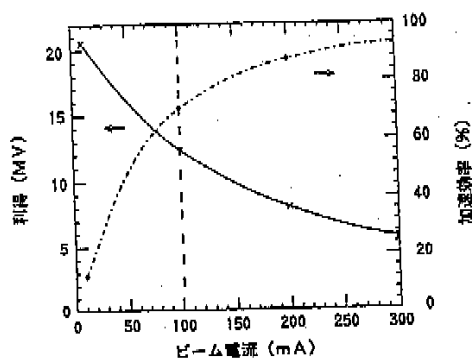


図10 レゾナントリング効率

も多い。例えば、ビームローディングの変化に対応した共振の維持や、大電力時の電力反射抑制等、新たな技術的対策が必要となる。このため、加速器の製作に先立ち、各要素の試作を行い、後述するように実際の運転に対応した電力で試験を行い、問題点の抽出を行った。

#### 4. 現在までの試験結果

クライストロン、加速管等の重要な構成要素に関しては、前述の設計に基づく試作を行い、高エネルギー物理学研究所と共同でその性能を確認した。

##### 4.1 クライストロン

本加速器用のRF源として、前出表3に示す仕様の大電力クライストロンの開発を進めている。まず、CWモード時におけるRF相互作用部の設計妥当性を評価するために、パルスクライストロンを試作し、入出力特性と陰極効率をショートパルス試験により評価した。測定結果の1例を図11に示す。その結果、実測値が設計値とほぼ一致していること、ビーム電圧90kV、ビーム電流22Aの時、効率が約63%、飽和利得が51dBとなることが明らかになった。63%という効率は目標値に比べて若干低いものの、Lバンドのクライストロンとしては世界最高水準の値であり、これにより開発に自信を深めた。

この成果を受けて、写真1に示すCWクライストロンを試作し、各種性能試験を実施した<sup>6)</sup>。大電力クライストロンにおいては、出力窓の熱応力破壊の防止が重要な課題であり、そのため窓材として熱伝導率の良いベリリアを採用するとともに、冷却水路を設けたビルボックス型窓とした。

CWモードでは出力電力300kWが得られたが、この時の窓の温度上昇が計算値の約2倍の90℃に達し、窓が破壊する恐れが生じた。そのため、それ以

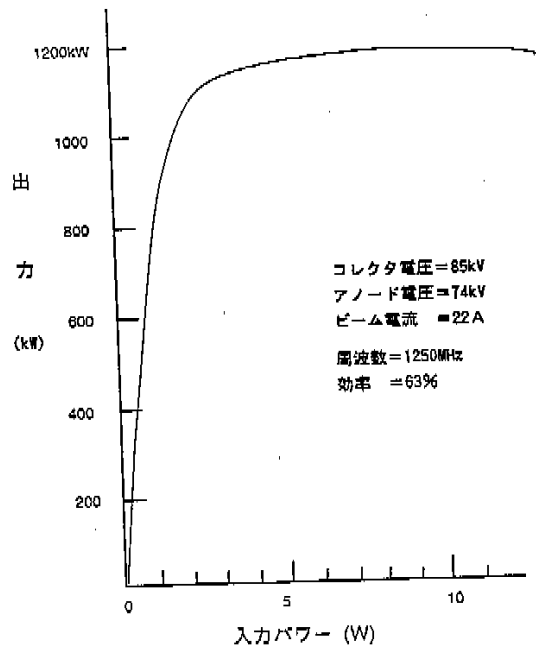


図11 パルスクライストロンの入出力特性

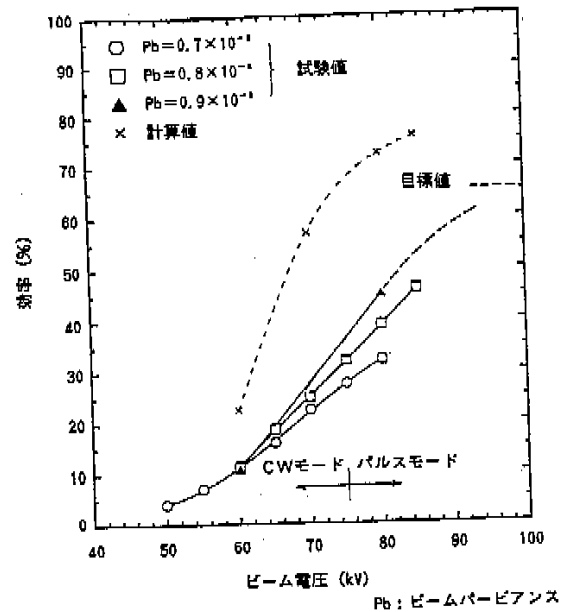


図12 試作クライストロンのビーム電圧と効率の関係

降は窓の熱負荷が少なくなるパルスモード（パルス巾50ms、繰り返し1s）に切り換え、エージングを行

いながら試験を継続した。図12にビーム電圧と効率の関係をビームパービアンس(Pb)をパラメータとして示す。パルスモードでは最大出力780kW、最大効率46%が得られ、ビーム電圧をさらに上げることにより、効率65%程度が達成できる見通しが得られた。

窓の耐電力特性をさらに正確に評価するとともに、窓の材質、形状の影響を把握することを目的として、レゾナントリングを用いた耐電力試験を行った<sup>7)</sup>。図13に試験体系を示す。レゾナントリングでは還流部内の電力を投入電力の約40倍に増幅させることができるので、窓試験に必要な1.2MWの電力が得られる。窓としては下記の3種類を用いた。

- ① ベリリアスタンダード窓  
試作クライストロンの窓と同一のもの
- ② ベリリアロング窓  
窓表面での電界を下げるため、ビルボックスの全長を約2倍としたもの
- ③ アルミナロング窓  
②と同一形状で材質がアルミナ

窓の反射係数と電界分布を計算により評価した結果、ロング窓はスタンダード窓よりマルチバクテリング<sup>8)</sup>（なだれ電子によるセラミックの発光）の発生を低く抑えとともに、窓のセラミックス部分におけるパワーロスを低減できるという特徴を有することがわかった。

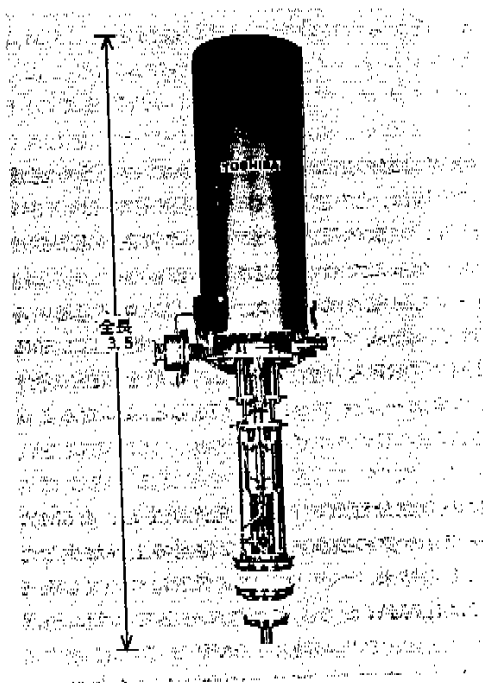


写真1 試作クライストロンの外観

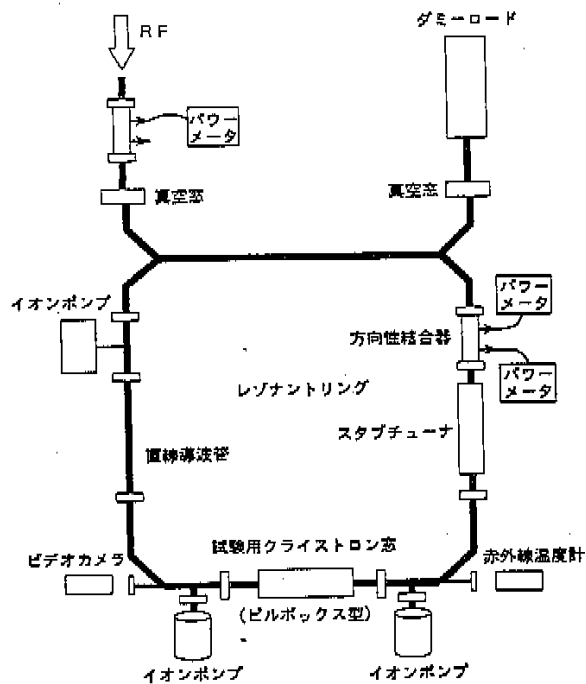


図13 クライストロン窓・耐電力試験体系図

CWモード時の投入電力と窓の温度上昇の関係を図14に示す。ベリリアロング窓に対しては、CWと1 MW以上でのパルス(5~20%)を併用してエー

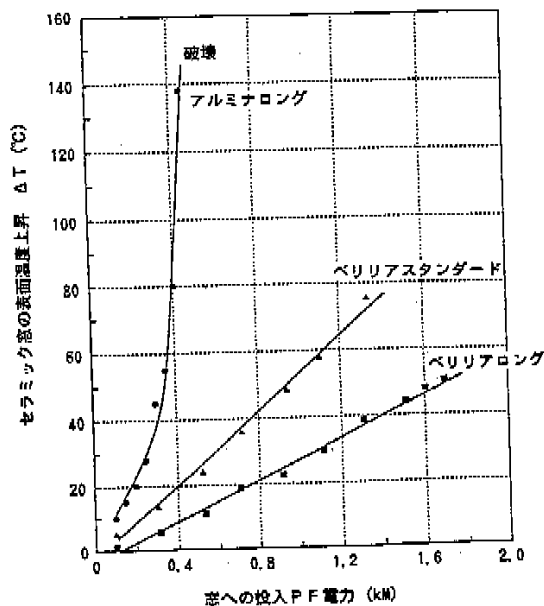


図14 セラミック窓の温度上昇 (CWモード)

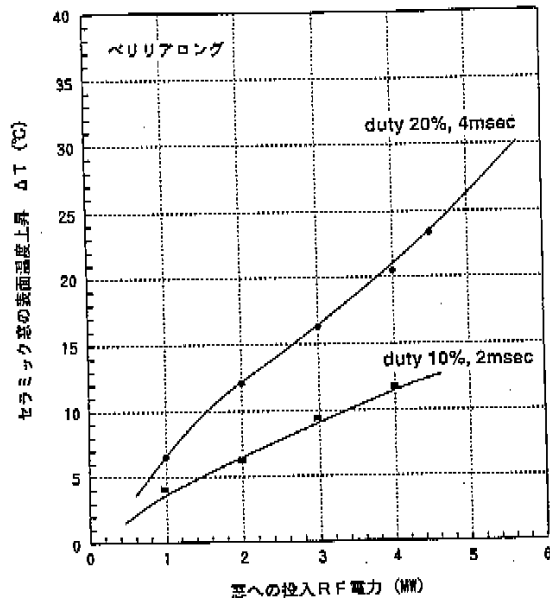


図15 セラミック窓の温度上昇 (パルスモード)

ジング(耐電圧を上げて行くこと)を行った結果、目標を超える1.7MWまでのCWモードによるRFの印加に成功した。最大RFを印加した時の窓の温度上昇はたかだか50°C程度であり、マルチパクティングも観測されなかった。

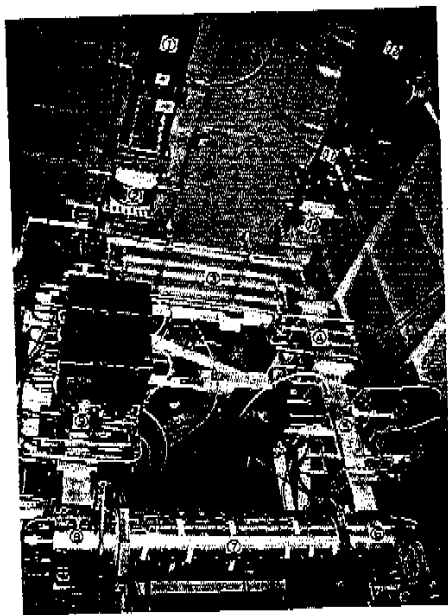
ベリリアスタンダード窓ではRF印加とともに500 kW付近から青白い発光現象が観測され、1 MW付近からマルチパクティングが定期的に発生した。

アルミナロング窓については460kWまでのRF印加を行ったが、温度上昇幅が139°Cと最も大きく、500kWで窓の破壊にいたった。このような温度上昇の原因は、他の窓よりも高い電圧定在波比(VSWR)により、試験体系の窓セラミック位置の電界強度が大きくなったためと推定される。

パルス耐電力試験には、ベリリアロング窓のみを使用し、2ms, 4msパルスモードの繰り返し50Hzで4.5MWのRF入力まで行った。結果を図15に示す。RFのデューティファクタは10%と20%であるが、4 MWまではマルチパクティングは観測されなかった。ただし、4.25MWを越えると窓表面周辺部に寿命数分程度の青白い発光が生じ、4.5MWではセラミックの表面の温度変化率の上昇が生じた。

以上の結果、ベリリアロング窓についてCWモードでは1.7MWまで、パルスモードではデューティファクタ10、20%の時に4.5MWまでのRF電力の透過に耐える窓構造の開発に成功した。今後は、ロングビルボックスのクライストロン全体としての効果





- |            |            |
|------------|------------|
| ① 導波管      | ⑦ 加速管      |
| ② RF窓      | ⑧ カプラ      |
| ③ RF結合器    | ⑨ 移相器      |
| ④ マイクロ波検出器 | ⑩ RF窓      |
| ⑤ スタブチューナ  | ⑪ マイクロ波検出器 |
| ⑥ カプラ      | ⑫ ダミーロード   |

写真2 大電力試験装置の外観

を計算コードHESSおよびMAFIA等により評価するとともに、VSWRの影響を調べていく予定である。

#### 4.2 加速管

本加速器ではLバンド進行波還流型加速管を採用しており、その基本仕様は前出の表2に示したとおりである。本加速管の特徴としては、レゾナントリング部に200kWのRFが投入され、内部ではこれが増幅されて800kWに達するため、このような大電力下でも安定した加速性能を要求されることが挙げられる。このためレゾナントリング一式を試作し、低電力試験によりその電気的特性を確認した後、クライストロンからRFを供給して大電力試験を実施した<sup>9)</sup>。写真2に大電力試験の体系を示す。

その結果、放電や過度な熱変形を生じることなく、最高で800kWまでのRFを印加することに成功した。また、本試験で得られた加速管のRF特性を計算値と比較して表4に示す。いずれも計算値と実測値が良い一致を示していることがわかる。さらに、図16に加速管内の電力と加速管冷却水温変化との関係を示す。実測値は還流型加速管におけるRFの減衰から求めた計算値と良く一致している。

表4 加速管のRF特性

|                                | 計 算 値 | 実 測 値 |
|--------------------------------|-------|-------|
| 電力増幅率                          | 9.06  | 9.12  |
| Q値 <sup>(1)</sup>              | 10797 | 11478 |
| 電力減衰率                          | 0.015 | 0.016 |
| $d\theta/d\phi$ <sup>(2)</sup> | 9.22  | 9.00  |
| $d\psi/d\phi$ <sup>(3)</sup>   | 58.7  | 70.2  |

- (1) レゾナントリングのエネルギー蓄積力を示す量  
 (2) 還流部を流れるRF入力位相の還流部内位相に対する変化率  
 (3) ダミーロードに流れるRF位相の還流部内位相に対する変化率

測定データからRF電力および温度が変動した場合の周波数変化として次の値が得られた。

RF電力当りの周波数変化  $-50.1 \text{ kHz}/100 \text{ kW}$

RF電力当りの温度変化  $2.1^\circ \text{C}/100 \text{ kW}$

温度当りの周波数変化  $-23.4 \text{ kHz}/^\circ \text{C}$

温度当りの周波数変化については低電力試験で冷却水温を変化させて測定した周波数変化値 $-25.3 \text{ kHz}/^\circ \text{C}$ とほぼ一致している。

また、本加速器の電力増幅率を安定に保つための運転パラメータとして、レゾナントリング反射に対する安定性を調べた。スタブチューナを調節した場合の反射による電力増幅率の変化を図17に示す。反射係数が0.1以下 (VSWR=1.2以下) では3.0~2.9の電界増幅率をもつことが実験的に判明した。今後は、加速器運転中に自動制御により反射係数を0.1以下に保つことが重要な課題となる。

以上の結果から、加速管に対しては、放電や熱変形を生じることなく、開発目標の800kWまでの大電力の印加に成功した。また、大電力条件下でも計算で期待されるとおりのRF特性が得られることがわかった。

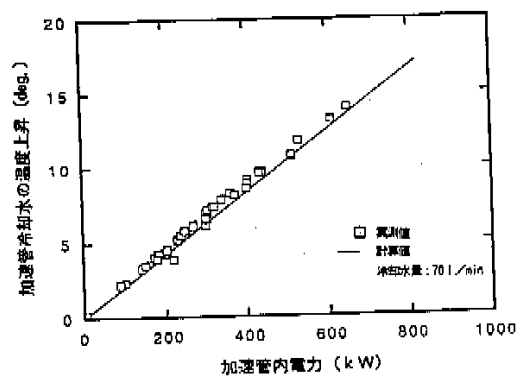


図16 加速管冷却水の温度上昇

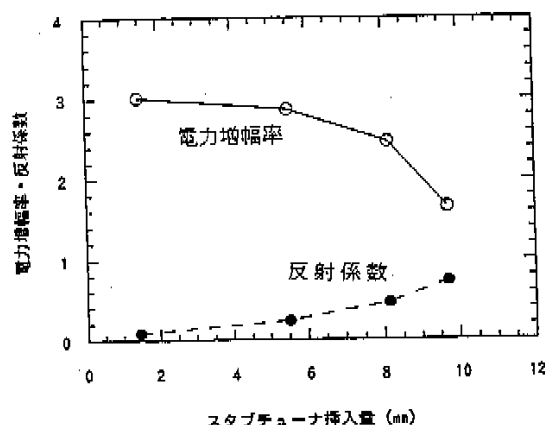


図17 スタブチューナ調整による増幅率、反射係数の変化

### 5. 今後の予定

以上述べてきたように、従来に例を見ない大電流の電子加速器の開発に向けて、設計、解析評価を行うとともに、クライストロン、加速管等の特に重要な構成要素については試作を行い、その性能を大電力試験等により確認した。その結果、目標とする大電流の達成に自信を深めた。

平成5年度からは加速器要素の本格的な製作を開始し、平成8年度にはすべての要素・機器の据付を終了する予定である。その後、徐々にビーム出力をあげていき、目標の最大/平均ビーム電流100mA/20mAを達成する計画である。それ以降は加速器の改良・高度化を目指した研究を行うとともに、本加速器で可能な範囲での核変換関連試験（反応断面積の測定、ターゲットの熱除去試験等）を実施する。

さらに大電流電子加速器の特徴を生かして、本加速器を消滅処理研究以外に幅広く利用することも検討しており、今のところアンジュレータを付加して自由電子レーザーの研究に利用すること、各種強力照射源として利用すること（電子線、ガンマ線、中性子線を利用した物性研究、材料照射等）、大強度陽電子源として物性研究等に利用することが考えられている。

### 6. 謝辞

本研究の実施に当たって、佐藤勇主幹教授をはじめとする高エネルギー物理学研究所の関係者各位には設計、実験、解析等のすべての面で共同研究者としてご協力いただいた。また、放射線医学総合研究所平尾泰男部長をはじめとする「大強度CW加速器研究会」委員各位には、巾広い御指導をいただいた。これらの方々に深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 石林、山岡他、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 (1992)。
- 2) R.Neal, "The Stanford two-mile Accelerators", Academic Press, (1970)。
- 3) P.A.Miller, R.I.Buller et al., "Propagation of Pinched Electron Beams for Pellet Fusion", Physical Review Letters, Vol.39 No.2 (1977)。
- 4) H.Arai and N.Goto, "An Analysis of a Vacuum Window for Lower Hybrid Heating" IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.PS-14 No.6, (1986)。
- 5) S.J.Miller, "The Traveling Wave Resonator and High Power Microwave Testing" Micro Wave Journal, Sep. (1970)。
- 6) 遠山、平野他、大強度CW電子線型加速器の要素開発 (III) - クライストロンの開発 -, 日本原子力学会, 1992年秋の大会
- 7) 平野、江本他、大強度CW電子線型加速器用クライストロン出力窓の開発, 日本原子力学会, 1993年秋の大会
- 8) M.Yoshida, S.Isegaue et al., "Instabilities due to Multipactoring, Modulation Anode Emission Found for TRISTAN High Power Klystron", Proceedings of the 6th Symposium on Accelerator Science and Technology, Oct. (1980)。
- 9) 尾下、遠山他、大強度CW電子線型加速器用加速管の開発, 日本原子力学会, 1993年秋の大会