

加速器・核分裂ハイブリッドシステムの 開発課題の検討

1996年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

加速器・核分裂ハイブリッドシステムの 開発課題の検討

大坪 章*、野村 昌弘*

要 旨

加速器と未臨界炉を組み合わせたハイブリッド炉システムは、極めて安全性に富むシステムとして、諸外国及び日本で研究されている。しかし、工学的には解決すべき課題が数多く存在する。

そこで、主に最も技術的成立性の高い、陽子加速器、固体炉心燃料を用いるシステムに関して技術的課題を摘出するとともに、その解決方法および難易度について検討した。

加速器部分の重要課題としては、イオン源のフィラメント寿命、ビーム損失の低減、C W R F Q（連続波型高周波四重極リニアック）及び大電流C C L（結合空洞型リニアック）の開発等がある。

未臨界炉については、T R U（M A）インベントリーの確保及び、燃焼欠損反応度の制御等が重要課題である。

両者の結合部では、磁石機器類の放射化・損傷対策及びビーム窓の開発等が重要課題である。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

Study on Technological Problems to Develop the Hybrid System of
an Accelerator Driven Fission Reactor

Akira Otsubo*, Akihiro Nomura*

Abstract

Hybrid systems with a subcritical fission reactor driven by an accelerator have been studied in a few foreign countries and Japan. Such a hybrid system concept can make a high safety reactor system, but they have many technological difficulties to be solved.

A system using solid core fuel and a proton accelerator is considered to have the highest technical feasibility among them. The technological difficulties were picked up to develop the system. Study was performed on methods to solve the difficulties of the methods.

Important problems concerning the accelerator were a life of a filament for anion source, decrease of proton beam loss, development of C W R F Q (Continuous Wave Radio Frequency Quadrupole Linear Accelerator) and C C L (Coupled Cavity Linear Accelerator) etc.

The problems concerning the subcritical reactor were possession of TRU(MA) inventory, control of burn-up reactivity loss etc.

The problems concerning the part connecting the accelerator and the reactor were countermeasures against damage due to radioactivation of magnetic components, development of a window for a proton beam etc.

* Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division.

目 次

1. 概要	1
2. 加速器本体に関する課題の検討	2
2.1 加速器システム	2
2.1.1 システム構成	2
2.1.2 イオン源のフィラメント寿命	4
2.1.3 ビーム損失の低減	7
2.1.4 非破壊ビームモニタの開発	8
2.1.5 C W R F Q の開発	9
2.1.6 大電流 D T L の開発	12
2.1.7 大電流 C C L の開発	12
2.1.8 大電力 R F 源の開発	13
2.1.9 現状技術の整理	14
2.2 加速器と未臨界炉とのインターフェイス部	14
2.2.1 磁石機器類の放射化・損傷対策	14
2.2.2 ビームラインに関する問題	15
2.2.3 ビーム窓の開発	16
3. 未臨界炉に関する課題の検討	39
3.1 燃料及び炉心	39
3.1.1 ピンバンドル型燃料	39
3.1.2 T R U (M A) のインベントリの確保	39
3.1.3 被覆管材料の選択	39
3.1.4 燃料欠損反応度の制御	40
3.1.5 溶融燃料	40
3.2 ターゲット	41
3.2.1 ターゲットの構造	41
3.2.2 ターゲットの交換	41

3.2.3	ターゲット部の最適化設計	41
3.3	反応度のモニターの開発	42
3.4	高エネルギー中性子の遮蔽対策	42
4.	おわりに	44
参考文献		47
付録		
	略語集	49

表リスト

表 2. 1	加速器施設の放射線線量率	18
表 2. 2	加速空洞で要求される R F 電力	19
表 2. 3	市販の大電力クライストロン	20
表 2. 4	現状技術の整理	21

図リスト

図 2. 1	陽子リニアックの基本スキーム	22
図 2. 2	加速器施設の基本構成の例	23
図 2. 3	デュオプラズマトロンイオン源の構造	24
図 2. 4	P I G イオン源の構造	24
図 2. 5	R F イオン源の構造	25
図 2. 6	デュオビガトロンイオン源の構造	26
図 2. 7	多極磁場バケット型イオン源の構造	27
図 2. 8	フィラメントの形状例	28
図 2. 9	E C R イオン源開発例 (C R N L)	29
図 2. 10	加速器システムの計測・制御構成	30
図 2. 11	R F Q の作動原理	31
図 2. 12	R F Q の構造概念	32
図 2. 13	D T L の構造概念	33
図 2. 14	シャフトインビダンスのエネルギー変化	33
図 2. 15	C C L 加速空洞の比較	34
図 2. 16	クライストロンの出力とパルス幅の関係	35
図 2. 17	原子炉構造図	36
図 2. 18	ビームの入射方向の例	37
図 2. 19	ハイブリッド炉の概念 (ロシアの例)	38
図 3. 1	溶融塩炉の構成	43

1. 概 要

加速器によって生じる高エネルギービームを、原子炉（未臨界核分裂炉）内のターゲット廻りに設置したTRU等から構成される炉心に照射させるハイブリッド炉が、高い変換効率が得られることや炉心が未臨界体系でよい等の観点から注目されている。そこで加速器・核分裂炉ハイブリッドシステム（以下ハイブリッド炉と記す）を開発していく上での課題整理を次のような視点から行った。

- (1) 放射性廃棄物消滅処理の実証を行うための実験用施設を、現状技術を基に建設しようとは何が未解決であり、何は解決見通しがあるのかについて整理する。
- (2) ハイブリッド炉についての課題を、(a)加速器本体に関する課題と、(b)未臨界炉に関する課題とについて整理する。特に加速器本体の課題については加速器メーカーの意見を聴取し、これを反映する。
- (3) 国内外でのこれまでの開発状況を基に、技術的成立性、許認可性の面から現状技術では何が未解決であり、何は解決見通しがあるのかについて整理する。

ハイブリッド炉で用いる主な要素技術（加速器要素）については現在精力的な開発が進められている。開発中のテーマについては加速器メーカーの知見は十分でない。また、公開文献のみの情報では限りがあるため、本検討では開発担当者からの情報や非公開文献等による情報を参考にしている。公開文献に基づく情報は出典を明記した。

2. 加速器本体に関する課題の検討

2.1 加速器システム

2.1.1 システム構成

放射性廃棄物消滅処理用に計画されているハイブリッドシステムでは、 10^9 (GeV) オフで数10mAの陽子ビームが必要とされている。このため、日本原子力研究所（以下原研とする）では、放射性廃棄物消滅処理の実証を行うために、1.5GeV、10mAの陽子加速器が計画されている。⁽¹⁾ 大型の加速器施設は、ビームを直線上に一度だけ加速する線形加速器と、円周上を繰り返し加速する円形加速器とに大別できる。両者の特徴は、線形加速器が直線上の1回きりの加速であるため、大電流の加速には適するが高エネルギー加速には向いていないのに対し、円形加速器ではその逆である。

これまでに、建設されてきた大型陽子加速器施設は主に高エネルギー物理学研究用のものである。高エネルギー分野でのエネルギーフロンティアを目指して建設され、できる限り高いエネルギーへの加速を狙っている。超高エネルギー (TeVオフ) 加速を実現するため、あらかじめ線形加速器によりあるエネルギーまで加速した後、円形加速器を用いて更に加速するものが多い。通常、電流値はマイクロampのオフと余り大きくない。ハイブリッド炉で計画されている加速器の規模をこれら高エネルギー物理学研究用のものと比べると、エネルギーでは3桁小さいものの電流値では3桁大きくなっている。

このような規模の大電流加速器としては、円形加速器の場合には大電流の制御が難しいため、線形加速器の方が適している。過去に建設された最も大規模な線形陽子加速器は米国ロスアラモス研究所 (LANL) のLAMPF (Los Alamos Meson Physics Factory) であるが、エネルギー800MeV、平均電流1mAと約一桁電流規模が小さくなっている。⁽²⁾ LANLでは、1980年代には線形加速器の高度化研究に取り組みビームの高品質化や大電流化において大きな成果を上げている。⁽³⁾ ここでいう高品質ビームとは、加速ビームがターゲットに向かって発散することなく加速されていくこと、すなわち収束性が良く加速途中でのビームロスがないことを意味している。LANLの主な成果は、加速器の入射器部の改良であり、高輝度イオン源と高効率バ

ンチャーと低エネルギー部の高収束加速機能を兼ねた高周波四重極型リニアック（RFQ）の開発にある。これらの開発意義は非常に大きい。何故なら、ビームの品質はこれら加速器要素に非常に強く依存しているからである。両者の技術的ブレークスルーによって高品質（ビームの発散性を押さえて良く絞り込まれたもの）で大電流の陽子を高効率（ビームのロスがない）で取り出せることが実証できた。⁽³⁾従来の加速器技術（例えば、1970年代に建設されたLAMPFや、高エネルギー物理学研究所（KEK）の陽子シンクロトロン用入射器（PSインジェクター））ではイオン源とバンチャーの効率が悪く、発生ビームの50%程度はバンチャー通過でロスされているが、高輝度イオン源とRFQ加速器により、90～95%程度の効率を得られている。また、ビームの品質は著しく向上した。但し、これらの成果の基となったのは、LANLのオリジナル技術ではなく、高輝度イオン源は核融合のプラズマ加熱用に開発された中性粒子加熱（NBI）装置用イオン源の加速器への応用であり、RFQ加速器は1970年代にロシアで考案されたものをLANLが実証したものである。LAMPFの運転経験と技術的ブレークスルーを基に、LANLではトリチウム生産用の加速器（APT）計画を構想した。⁽⁴⁾その後、APT構想は中止となり、代わって加速器による放射性廃棄物消滅処理（ATW：Accelerator Transmutation of Waste）計画を打ち立て今日に至っている。⁽⁵⁾また、これらの開発技術はSSC計画に引き継がれている。APTもATWも100mA、GeV級の線形陽子加速器が計画の中心にある。これは、LAMPFの100倍もの大電流であるにもかかわらず、LANLではこれまでの技術開発に自信を得ているためか十分に対応可能であるとの見方をしており、ATW計画では加速器の技術開発よりもむしろターゲット系での燃料（廃棄物）取り扱いに係わる化学処理プロセスの工学的実証に研究開発のポイントを置いているようである。

LANLのATWは、核分裂増倍中性子の利用を考慮していないため電流値がハイブリッド炉構想より大きくなっているが、加速器の基本的なシステム構成は同様に図2.1、図2.2の通りであり以下の基本構成となっている。

- イオン源
- RFQ加速器（入射器部）
- DTL加速器

○ C C L 加速器（高エネルギー加速部）

○ 駆動用 R F 電源設備

○ 真空排気設備

○ 冷却設備

○ 計測制御設備

○ ビーム診断輸送系設備

○ 電気、空調等諸設備

○ ターゲット系設備

これらの中、既存の加速器技術で対応できるものが多いが、大電流化に伴う技術課題として、

○ ビームの計測制御

○ 大電流化に伴う除熱などの工学的課題

○ 放射化防止の観点でのビームロスの抑制

等がある。

以下、各要素について、開発の現状と課題を整理する。

2.1.2 イオン源のフィラメント寿命

（要求性能）

ハイブリッド炉で用いる加速器用のイオン源の要求性能の一例を下記に示す。⁽⁶⁾

加速粒子	陽子
引き出しエネルギー	数10～100keV
ビーム電流	120mA
チューターファクター	100%（連続；CW）
規格化エミッタンス	$0.5\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
プロトン比	90%以上
不純物量	10% 以下（+1価水素分子が9%以下、+1価窒素及び 酸素原子等が1% 以下）
フィラメント寿命	1年間

フィラメントの寿命は燃料交換の間隔以上あることが望ましい。

(イオン源開発の現状)

陽子加速器用のイオン源としては取り出しビームの品質を良くすることを主眼に開発され、これまで次のようなものが作られている。

○デュオプラズマトロン(図2.3)⁽⁷⁾

1000ガウス程度の強磁場内で熱陰極アーク放電によって発生する濃いプラズマを利用するもので、熱陰極、中間電極、陽極の3電極からなる放電管である。プラズマ境界層から放出するイオン電流密度はプラズマ中のイオン密度に比例し比較的大電流化が達成できている。プロトン比が40%以下と良くないのが欠点であり、最近は改良版のデュオピガトロン(後述)が用いられている。

○ペニングイオンゲージ(P I G)放電型イオン源(図2.4)⁽⁷⁾

放電箱の中に上下陰極を入れ、その中間に電氣的に絶縁した陽極が入った構造をしている。放電箱の廻りにはソレノイドコイルを巻いて軸方向に磁場を作っている。陽極にパルス状の高電圧を印加すると陰極表面から放出された電子は陽極に向かって加速を受け、次にリング状陽極内部に達するとこの領域で残留水素ガスを電離する。最初の電子はなお余剰のエネルギーでこの領域を通り抜け反対の陰極で追い返される。追い返された電子は同じ過程を繰り返し軸方向の振動を引き起こす。この電離方式はパルス運転に適すること、投入エネルギーの割にイオン電流が大きいなどの利点があるが、反面、陰極の表面形状などに敏感であることはプロトン比を低くするなどの欠点があり、中規模のイオン源に用いられている。

○高周波(R F)放電型イオン源(図2.5)⁽⁷⁾

構造が簡単でビームのプロトン比が高く、収束性に優れ、ガス消費量が少ないという特徴がある反面、大きなR F電力の注入が困難であるため数mA以下の小規模イオン源に適している。静電型加速器等で良く用いられている。

○デュオピガトロン(図2.6)⁽⁸⁾

デュオプラズマトロンとP I Gとを組み合わせ改良を加えたものである。数10-100 mAで 1π mm・mrad程度のエミッタンスのビームは実現されており、A P T、C R N L等の大型加速器のイオン源として計画されている。しかし、縦磁場を使用することか

ら、多極磁場型のものとは比べて安定性に欠けると言われている。更に、プロトン比がまだ要求性能と比べて小さいという欠点もある。

一方、核融合のプラズマ加熱（NBI）用に大電流イオン源が開発されてきた。JT60のプラズマ加熱では数秒間に100MWの加熱が必要である。これは、100keV、1000Aのビームに相当する。40Aのイオン源を28台パラに用いることで計画されている。⁽⁹⁾ 加速器の目的によっては負イオン源が正イオン源よりも望ましく、例えば中性粒子加熱（NBI）の場合加速後にビームを中性化して取り出す必要があるが、負水素イオンの方が中性化が容易である為、負水素イオン源の開発が行われており70eVのものも開発されている。一般的に高品質ビームの取り出しと大電流取り出しとは両立しにくい概念であるが、両者の要素を兼ね備えたものが高輝度イオン源と呼ばれるものである。NBIイオン源の開発を基盤に加速器施設の大型化に適合する高輝度イオン源の開発が大いに進展した。

特に、原研では図2.7に示すようなマルチカスプ磁場でプラズマを閉じこめた、バケットタイプのイオン源を開発中である。これまでの測定では目標値（120mA、100keV）に近い56mA、60keVのビーム取り出しに成功しており、その時の、ビーム品質もプロトン比80%、規格化エミッタンス $0.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と良好である。

試作の設備は電源設備の電圧設定に余裕がなく最高電圧近傍でやや作動が不安定であったことを除くと順調な性能である。今後更に実機製作に向けて改良を積むことで比較的容易に目標の達成が可能である。⁽¹⁰⁾

（フィラメントの寿命）

バケット型イオン源に用いられるフィラメントは図2.8のようなヘアピン状のタングステン棒である。太さは直径2mm程度で形状はフィラメントが作る磁場とバケット内の磁場とが上手く折り合うように決められる。長寿命化のためには太いフィラメントが望ましいが、磁場への影響などからみだりに太くはできない。フィラメントの寿命は専門家によると100時間程度と推測されている。加速器を実用プラントの一部品として長時間連続で使用する場合には、フィラメントの交換の都度不定期且つ頻りに加速器を停止することは避けなければならない。フィラメント交換の際に加速器の停止を避けるためには、複数台のイオン源を用意してビームオン状態のまま定

期的に切り替えて交互に使用するシステムを採用し、使用中でない方のイオン源のフィラメントを交換する等の方法を採用することが必要である。交換頻度を少なくするためには、フィラメント寿命を延ばすことが望ましく、可能であればフィラメントレスのイオン源が望ましい。実験用施設として位置づけるのであれば、フィラメント寿命の延長にはさほどこだわる必要はないが、実用プラントの開発にはフィラメントレスのイオン源の開発が期待されている。

フィラメントレスのイオン源としては、CRNLなどで図2.9に示すようなECRイオン源（高周波を用いたプラズマ生成）の研究が行われており、30mAの電流密度が得られているが実用に至るまでにはもう少し時間がかかる状況にある。⁽¹⁰⁾

2.1.3 ビーム損失の低減

大型加速器施設のビーム損失はエネルギーの高い部分では発熱や放射線損傷、放射化等の問題が大きくなるので許容されにくくなる。LAMPFの実績では、高エネルギー加速器部（CCL）で、平均0.2nA/mのビームロスがあり、これによる加速管の放射化レベルは4mrem/h程度とされている。⁽¹¹⁾（表2.1）約1000mの施設であるから、施設全体のビームロスは0.2 μ Aであり、平均ビーム強度1mAの1/10000に相当する。ビームロスは施設全体に平均的に生じるものと、ある特定の箇所で局所的に生じるものがある。ビームがロスし易いのは加速管の種類が替わる接合部のように電場強度や、収束磁場の強度が替わる部分などが多い。局所的に高くなる部分のことを考慮に入れると、平均の放射化レベルはLAMPFの実績程度すなわち0.2nA/m程度が上限である。ハイブリッド炉では加速ビームエネルギーがLAMPFとくらべて大きくなる（800MeV→1500MeV、1mA→数10mA）ことから、単位長さあたりのビームロス電流値を同一レベル以下に押さえるために、ビーム漏洩割合を数10分の1以下にする必要がある。平均ビーム強度が10mAの施設では、1/100000（ 10^{-5} ）以下のビームロスに押さえる必要がある。

ビームロスを少なく押さえるには、

- (1) 発散性の少ない高品質ビーム（これを低エミッタンスという）をイオン源から引き出し、
- (2) 低エネルギー加速部でこれを上手く初段加速を行って、エミッタンスの増加を与

えない状態で後段の高エネルギー加速部に引き渡すこと

(3) 高エネルギー加速部ではこのビームを許容されたロスの範囲内で加速すること

(4) 加速器中でのビームの状態を正確に把握すること

等々が要求される。

これを実現するために、

(a) 高輝度イオン源の採用

(b) 加速用のビーム口径に対し、加速されるビーム径を十分に小さく絞った状態で加速し、ハロービームが加速管壁に当たらない（ロスしない）ようにすること

(c) RFQ, DTL, CCL等各加速器の基本構成や加速パラメータを最適化して、エミッタンスの拡がりをビームに極力与えない状態で加速できるようにすること

(d) 大電流でも使用できるビームモニタを開発すること

等々が必要である。(a)、(d)は要素技術開発の問題であるが、(b)、(c)はハイブリッド炉の加速器システム設計の基本計画に係わる問題である。ビーム挙動評価コードを用いてかなりの精度でシミュレーションが可能になっている。専門家の意見によれば、ビームロス1/10000のレベルまでであればLAMPFで評価コードの実証が行われているので、これより更に1桁少ない1/100000のレベルまでであれば、今後のR&D成果を反映することや評価検討をきめ細かく行うことにより達成しうる範囲である。

2.1.4 非破壊ビームモニタの開発

加速器の運転・制御は運転中のビームの状態をモニターすることで行われる。ビーム径の大きさや、軸方向に固まりとなった（バンチされた）ビームの軸方向長さや電流量、ビームエネルギー等はビームの制御を行う上での基本的な量である。加速管に沿ってこれらを一定間隔毎に知ることができると収束用磁石の強度や加速電場の状態などを把握することができ、その結果を反映してビーム制御を行っている。（図2.10）電流量の少ない加速器においては、ビームが通過する場所にセンサーをおいて（ビームとセンサーとを直接作用させて）ビームをモニターする方法が採られてきた。しかし、計画中のハイブリッド炉加速器のように大電流（平均10mA以上）の場合、センサーを直接作用させることは困難になり、間接的にモニター（非破壊ビームモニター）することが必要となる。電流量等は従来からカレントトランスフォーマーにより非破壊モニターと

して用いられてきている。ビーム形状やエミッタンスのモニターなどを非破壊的にモニターする方法は、まだ完成されていない。現在開発中の非破壊モニターとしては電子加速器用に残留ガスを用いた方法などがある。

2.1.5 C W R F Q の開発

(要求性能)

ハイブリッド炉で用いられる R F Q の要求性能は下記の通りである。⁽¹²⁾

加速粒子	陽子
加速エネルギー	数 MeV
ビーム電流	数 10mA
デューティファクター	10~100%
ビーム透過率	90%以上

(加速器の開発現状)

加速器の運転方法としてパルス運転（運転、休止を細かく繰り返し行う）と連続運転とがある。大型加速器の加速電場は殆ど高周波電源により供給されており、この、高周波電源での電場形成をパルス状に行うのをパルス運転という。この、パルス運転の繰り返し周波数とパルス時間幅とにより加速器の実効的な作動効率（デューティファクター）が決められる。繰り返し周波数 100Hz、パルス幅 1ms の例では、10ms の時間間隔に 1ms の時間のみ高周波電源が供給されビームが加速されることを意味している。加速器として 1ms 作動し、続いて 9ms 休止することを繰り返し行うことである。この場合は、デューティファクター 10% となる。パルス運転においてパルス幅を一定のまま繰り返し周波数を上げていくと、先の例で、200Hz ではデューティ 20%、500Hz では、50% となり、1000Hz では 100% となる。つまり、休止期間がなく常に作動状態である。この状態をパルス状の波が連続した状態、C W (continuous wave) と呼ぶ習慣がある。

ついでに、混乱しやすい概念として、高周波電源の周波数とパルス運転の際の繰り返し周波数とがあるので両者の違いについて述べる。

ビームを加速するために高周波電源により繰り返し供給される電場の周波数は 100 ~ 1000MHz のオーダーである。この程度の繰り返しで、ビームを非常に短く固めて（バンチして）加速してゆく。そして、この加速する状態を 1ms 程度の時間継続し、9ms 休

止するとの繰り返し（100Hz）でパルス状運転を行うのである。1msのビームパルスの中を更に細かく見れば、1ns程度のパルス状のビームが100万個連なっている。そこで、1nsの一つ一つをマイクロパルス、そして、そのmsオーダーの集団をマクロパルスと呼んで区別している。従って、CW運転の状態の時には、マクロパルスは連続となってしまう状態であるが、マイクロパルスはパルス運転の時と同様に存在している。

(RFQの作動原理)

CWRFQの課題について、その困難さを理解しやすくするためにRFQの役割と作動原理について以下に整理しておく。

先に述べたとおり、高エネルギーまで加速する加速器は高周波電源でその加速電場を作っている。静電場加速では放電限界があり、数10MeVが加速限界である。高周波電源とは正弦波で繰り返し電場を供給するものであるため、電場の正と負が交互に繰り返す。正電場の時加速される粒子は負の電場では減速されるため、高周波で加速するためには次のような工夫が必要である。

- ・粒子を加速されるビームの軸方向に沿った連続の流れとしてではなく、点状に近いマイクロ集団のとびとびの列として集める。（マイクロパルスを形成することをバンチングという）
- ・加速器の配列を加速部分と単なるドリフト部分の繰り返しにしておくと、一定間隔で加速部分が現れるので、高周波電場が正になるときに加速部にきて負のときにはドリフト部になるように加速構造と周波数と粒子の速度を同期させることで、粒子は加速部で常に加速のみ受けることになる。これが仮に、バンチングされていないビームであるとすると、加速減速を共に受けることになる。そのため、高周波加速においては、必然的にビームはバンチされたものでなければならない。

イオン源から引き出されたバンチされていないビームをバンチするために、従来はバンチャーと呼ばれる装置を用いていた。高周波加速空洞には先に述べたとおり、バンチされていない連続したビームに対し加速減速を正弦波状に与える性質がある。加速を受けた部分の粒子は速度を増し、先の集団に近づき、減速された部分の粒子は遅れて後の集団に近づこうとする。バンチャーは高周波加速空洞の一つを用いたものであり、バンチャーを通過することでマイクロパルスが自然に形成された。但し、バンチ

ャーでのビーム透過効率が50%程度と余り良くない。RFQは効率よくバンチを行うために考案されたものである。また、ビーム加速が同時に行えるので、従来初段加速に必要であった静電型加速器（コッククロフト型）と置き換えることができるようになった。

RFQは加速空洞内に高周波電源で形成される4重極電場を用いてビームを収束させている。4重極電場の形成のため図2.11のように4枚のペーンを用いている。ペーンの先端に軸方向に波(モジュレーション)をつけることで軸方向電場を作っている。この軸方向電場の強度と4重極電場の収束力の加減により、ビームを程良くバンチして適度なエネルギーにまで加速することが行われている。そのために、加速器の構造としては、ペーン先端の形状は、軸方向と半径方向とに要求される電場を形成する必要があり、3次元機械加工が必要となる。ペーンの先端電圧が不揃いであると4重極電場の他に高次モードの電場が形成され易くなりビームが不安定となる。RFQの機械加工は高精度が要求されている。平均電流が大きい場合、パルス運転とするかCWとするかの選択でRFQの場合次のようなトレードオフがある。

パルスの場合：

デューティ10%ではCWの10倍ピーク電流が大きくなるので、空間電荷力によるビームの発散を防ぐため収束力を大きくする必要があり、ペーンの精度要求が厳しくなる。

CWの場合：

ピーク電流と平均電流とが等しくできるので空間電荷力の制御は楽であるが、デューティ100%であるため、RFによる加速管壁面の発熱がパルス運転の時よりも大きくなる。デューティ10%のパルス運転と比べると10倍大きいため、加速管の冷却(除熱)構造がむづかしくなる。除熱が制御できないと熱変形などでRFQの特性が悪くなる。

これまでに、RFQについては、平均10mA程度のもののパルス運転について特に大きな困難は見つかっていない。⁽¹³⁾ 図2.12にLBLのRFQの構造概念を例として示す。加速周波数にもよるが、200MHz程度のものについては国内での実績は良好である。350-400MHzはLANLを除いて大電流化の見通しが立っているとは必ずしも言

い難い。

2.1.6 大電流DTLの開発

(要求性能)

ハイブリッド炉で用いられるDTLの要求性能は下記の通りである。

加速粒子	陽子
加速エネルギー	約100MeV
ビーム電流	数10mA
デューティファクター	10～100%
ビーム透過率	ほぼ100%

(開発の現状)

DTLはRFQと比べると実績の多い加速管構造である。1970年代に建設された線形加速器(KEKやLAMPF)等で、750keV程度の入射エネルギーで使用されている。DTLの役割としては1MeV程度の入射エネルギーのビームを、後段の加速器であるCCLの都合の良いエネルギー(100MeV程度)まで加速してやることである。DTLの構造的特徴として、図2.13に示すようにビームのエネルギーが増すにつれて加速管が長くなってゆき、図2.14のようにエネルギーの増加とともに加速効率が悪くなってゆく。100MeV以降は違う加速原理のCCLに引き継ぐことが通常行われている。

大電流に対してDTLを用いることはピーク電流の制御という観点からは、従来技術でかなりのレベルに到達できている。これまでの実績はピークカレントは大きくてもローデューティであるため、冷却・除熱の問題は楽であった。ハイブリッド炉はハイデューティを目指しているため、ドリフトチューブに内包した収束用電磁石のジュール熱やRFによる加速管壁面の発熱の除熱が課題である。

除熱の問題は、加速管が相対的に短い低エネルギー部が最も困難である。デューティ10%のDTLに対して行われた除熱性能の試験では実機での見通しが得られている。⁽¹⁴⁾デューティを10%以上に増加させて100%に向けて検討中である。

2.1.7 大電流CCLの開発

(要求性能)

ハイブリッド炉で用いられるCCLの要求性能は下記の通りである。

加速粒子	陽子
加速エネルギー	1.5GeV
ビーム電流	数10mA
チューナーファクター	10~100%
ビーム透過率	ほぼ100%

(開発の現状)

CC Lの構造は、これまで次の様なものが提案されてきている。⁽¹⁵⁾ (図 2.15)

SCS (Side -Coupled Structure)

ACS (Annular -Coupled Structure)

DAW (Disk-and-Washer)

実績があるのはLAMP Fで採用されているSCS (Side -Coupled Structure)である。

高エネルギー部分はビームエネルギーの殆どをここで加速するところである。加速器の性能・コストを決める重要なポイントである。特に、線形加速器の90%位をCC Lが物量的に担うことになるため重要である。また、表 2.2 に示すように高周波電源の90%近くは同じくここで消費されるため、運転費の面でも加速構造の選択は重要な要因を担っている。経済性を無視すれば、SCSに関してLAMP Fでの20年の実績があり、ハイブリッド炉のリファランスとして利用が期待できる。

RF電源との兼ね合いでもあるが消費電力を小さくすることや、電場勾配を大きくして加速管長を短縮するなどの狙いで超伝導加速空洞が注目されている。これを用いる場合には、加速空洞の形状の設定や超伝導状態の維持機能の確認など基礎的な研究開発が必要になると思われる。

2.1.8 大電力RF源の開発

ハイブリッド炉の加速器システムの選択で、特に高エネルギー加速管の構造選択が重要であることを述べたが、その選択で最も重視されるのは加速効率の問題である。加速管に供給する電力必要量が最も少ない加速構造の選択が望ましい。加速管の電場勾配を大きくすると、加速器の長さは短くなるが電力消費量は増加して電源の負担が大きくなる。従って、高エネルギー加速部の電場勾配の設定には加速管の長さに比例

する、加速構造の物量と用地代という観点と、電源設備の負担の大小という観点とのトレードオフが絡む。600～1000MHzの周波数帯でMWオーダーの電力が取り出せるRF源としてクライストロンが実績のあるものである。表2.3に示すものが既存の電源であり電源メーカーで供給している。また、これまでに使用されている実績を図2.16に示す。これらのものから選択することが考えられるが、ハイブリッド炉での利用となるとまとまった需要となることが期待されるから、最適な条件となるように現存する電源を改良することも可能である。技術的には要求条件を満たしうる、電源設備は現存すると考えられる。寿命や安定性での改良と制作面での合理化追求が今後の開発の狙いである。

2.1.9 現状技術の整理

実験用にハイブリッド炉システムを作ろうとする場合の現状技術からの実現見通しを表2.4に整理する。

2.2 加速器と未臨界炉とのインターフェイス部

2.2.1 磁石機器類の放射化・損傷対策

線形加速器により水平に加速された粒子を炉心の上部から垂直下方に未臨界炉へ導くには、少なくとも1回ビームを90°に曲げる必要がある。この他、ターゲットへ適度な拡がり（面積）をもって入射させるには、ビームラインに偏向磁石やビーム径拡大磁石を設置する必要がある。（図2.17）これらを炉心に近接して設置すると、炉心からの漏洩中性子の照射により機器・磁石類が放射化したり損傷を受けることが予想される（0.1MeV以上の高速中性子累積照射量で 10^{21} n/cm²以上）ため、可能な限りこれらの機器を未臨界炉から離して設置し、過度な放射化や損傷を受けないように配置・遮蔽対策を行う必要がある。漏洩ビーム量を制限して放射化を押さえることは加速器設計への要求項目の一つである。一方、未臨界原子炉からの漏洩中性子による機器放射化を防止することは、原子炉本体を遮蔽する上での基本的要求事項に係わるものである。炉心上部方向には、ビーム導入ラインが存在するがこれは図2.17のように基本的には真空の直円筒ダクトである。上部方向から陽子ビームを原子炉へ導入する経路となると共に、原子炉で発生した中性子を上部方向へ漏洩する経路となる。機器の放射化や

損傷の度合いは、下記により決定される。

- ・陽子照射によるターゲットでの中性子発生量（エネルギー、角度分布）
- ・上部方向への中性子漏洩量（ビームダクトからのストリーミングと透過量）
- ・漏洩中性子による放射化量

現在、炉心部の核反応や中性子漏洩量は計算する手順が整えられつつあり、計算精度は明確ではないものの目安となる計算結果を得ることは可能である。計算精度を明らかにするために、LANLやKEK、ロシア等で各種のベンチマーク試験や解析が行われており、高エネルギー陽子ビームとターゲットとの核反応により生成する中性子の発生量や角度分布は徐々にデータが蓄積されてきている。⁽¹⁷⁾ 適当な放射化防止や損傷対策を講じるために、評価を適切に行う必要がある。高エネルギー核反応や損傷に関する核データ等の整備が必要である。各種データの蓄積が図られつつあるので、今後データの信頼性が向上してゆくものと期待される。

2.2.2 ビームラインに関する問題

(1) ビームラインとの配置上の干渉

ビームラインからの粒子（陽子）を原子炉（未臨界炉）に導入する方法は、導入方向によって、上部、側部、下部に大別される。スイス（PSI）の中性子源加速器（SINQ）やKEK強力中性子源（KENS）計画では実験の容易さや対称性の配慮から下部からのビーム流入方式を用いている。（図2.18参照）一方、ロシアのITEPでは図2.19のような側部流入方式を提案している。⁽¹⁶⁾ ハイブリッド炉の基本構成の基にしている液体金属冷却高速炉の場合、軽水炉と比べて、原子炉容器の下部方向や、側部方向が配置上の干渉が少ない。しかしながら、1次冷却材のバウダリを確保する観点からは、ビームラインは上部から未臨界炉体系に導かれることが強く望まれる。その場合、原子炉上部方向に存在する機器（制御系、計測系、燃料交換系）との干渉を避ける必要がある。これらの問題は、基本的には設計上干渉を避けるように配慮すれば良いのであるが、各機器の構造概念に影響する場合もあるため、概念設計の早期の段階で配置上の見通しを立て、構造上の要求条件を明らかにしておく必要がある。

(2) ビームラインからの中性子ストリーミング対策

ビームライン（未臨界炉系へのビーム導入部）は図 2.17 のような空洞（真空）であるため、炉心部（ターゲット）で発生した中性子（高エネルギー）を炉心から外部へ漏洩（ストリーミング）させ易い。炉上部方向へのストリーミング中性子によって(2)項で既に述べたように磁石や機器類の放射化や損傷の問題があるが、それに加えて原子炉上部のその他のアクセス領域が制限される。この問題が生じることがないように炉上部方向の配置や遮蔽対策を講じる必要がある。

(3) 燃料交換時のビームラインの除去

燃料交換は原子炉上部からの燃料出し入れを想定している。燃料交換時にはビームラインが邪魔になる可能性がある。そのときには、ビームラインを除去する手順を具体化し配置上の干渉がないような手順を明確化しておく必要がある。

2.2.3 ビーム窓の開発

(1) ビーム窓の照射損傷、冷却、材料選択

軽水炉約10基分のTRU（260kg/年間）を消滅処理するためには、数10mA、1.5GeVの陽子ビームが必要とされている。これは、ビームパワーが数10MWに相当するため、ビーム窓の照射損傷の防止対策が必要となる。熱負荷も約1kW/cm²弱と大きく冷却方法等が大きな課題である。冷却については金属製のビーム窓を液体金属冷却材で直接冷却することで高熱負荷の除熱が可能と思われるが、ビーム窓は原子炉系（未臨界炉）と加速器系との境界（1次冷却材バウダリ）を形成するためその構造健全性については、特に留意する必要がある。

ビーム窓は高温と高放射線照射量に耐える必要があり、酸化物分散強化型（ODS）鋼が候補に挙げられているが、適正な材料選択であるか否かを判断するには照射データを蓄積してゆく必要がある。ここで、ビーム窓の年間照射量は1.5GeVの陽子ビームで 6×10^{21} p/cm²（40mA、ビーム窓の半径20cm）となる。このような照射条件で使用するには、早急に照射計画を具体化して照射試験を実施する必要がある。

(2) ビーム窓の交換方法

ビーム窓の材料をODS鋼とし、各サイクル毎に窓の交換を行うものとする。加速器・核分裂ハイブリッド炉施設の稼働率を向上させるためにはビーム窓の交換を

短時間で行う必要がある。ビーム窓は図 2.17 に示すように加速器ビームラインの真空系と原子炉 1 次冷却材との境界を形成するものであるため、交換に際しては両者の仕切りをつけておく必要がある。また、ビーム窓自体が強く放射化していると予想されるが、これらの対応は、程度の違いはあるにしても高速炉の 1 次系機器交換の手順と同種の問題であり、高速炉の建設・運転経験が反映できる部分である。従って高速炉の設計や運転の経験を踏まえることで、原子炉ビーム窓の交換方法を具体化することは可能であると判断する。

(3) ビーム窓の破損時対策

ビーム窓には原子炉 1 次系バウダリ-の確保が要求されている。窓の入り口側では加速器本体と真空系として繋がっており、窓の出口側では 1 次冷却材を介して原子炉本体と繋がっており、ビーム窓は正に加速器施設と原子炉施設との接点である。仮に、ビーム窓の破損が生じた場合にも、1 次冷却材が加速器系（加速管）側に漏出してゆかないように対策を取っておく必要がある。これは、設備的な対策のみならず、ハイブリッド施設の安全設計の理念に係わる部分であるため、典型的な事故シナリオなどを十分に検討し、指針・基準を準備しておく必要がある。

表 2. 1 加速器施設の放射線線量率 (11)

Radiation dose at an accelerator facility

PARAMETERS	LAMPF	APT
Activation (mRem/h)	4	100
Beam Loss (nA/m)	0.2	5
Fraction	2×10^{-7}	2×10^{-8}
Aperture / Beam (RMS)	6.3	20
Beam Energy (MeV)	800	1600
Beam Current(mA)	1	250

表 2. 2 加速空洞で要求される R F 電力⁽¹⁵⁾

RF electric power required for acceleration cavity

	R F Q	D T L	C C L
加速周波数 (MHz)	432	432	1296
加速エネルギー (MeV)	0.05-3	3-150	150-1000
加速タンク数	1	13	36
全必要電力 (MW)	1.1	11.9	99.1
平均電力/タンク (MW)	1.1	0.92	2.75
最大電力/タンク (MW)	1.1	1.0	3.0

表 2. 3 市販の大電力クライストロン⁽¹⁵⁾

Commercial high power klystron

現在市販されている長パルス(100 μ s以上)、大電力(1kW以上)クライストロン

	fre- quency (GHz)	peak power (kW)	average power (kW)	duration (μ s)	high voltage (kV)	effi- ciency (%)	modu- lation anode
VARIAN							
YKP-8264	0.224	3.0	376	1,000	110	40	○
VA-842	0.4~ 0.45	1.25	76	2,100	100	45	○
-812D	//	16	76	40	190	36	×
-812E	//	20	300	40	230	31	×
-862B	0.714	1.2	170	2,000	86	50	○
-862A	0.805	1.25	150	1,000	86	52	○
-862C	0.933	2.0	250	10,000	110	45	○
YKL-7766	1.235~ 1.305	10.6	60	40	155	42	×
4XMP-3000	1.235~ 1.365	2.0	100	1,000	110	29	○
X-780	//	2.6	76	2,000	115	37	○
VA-963D	1.25~ 1.36	6.0	0.25	60	132	35	×
YKL-7796	1.29~ 1.36	4.0	300	130	112	43	○
-7783	1.33~ 1.38	2.6	100	2,000	120	37	○
THOMSON							
TH-2086	1.25~ 1.35	1.5		100 μ s	80	40	×
-2115	1.3	2.0	160	1,000	82	40	×
-2095A	//	6.25	45	310	130	42	○
-2104	//	10	100	200	168	38	×
VALYO							
Y-162SX (STUDY)	0.202	3.6	2,000	300~ 1,400	140	>65	○
-160SX	0.224	3.0	1.2%	1,000	110	>65	○
-107SX	0.324	1.6	1,000	600	100	>65	○
-116SX	0.324	3.6	410	1,100	140	>65	grid
LITTON							
L-3403	0.4~ 0.45	1.25	76	2,100	105	-	○
東芝-PNC							
	1.25	CW	1.2	CW	90	63	○
		パルス 8.3		800	147	-	○

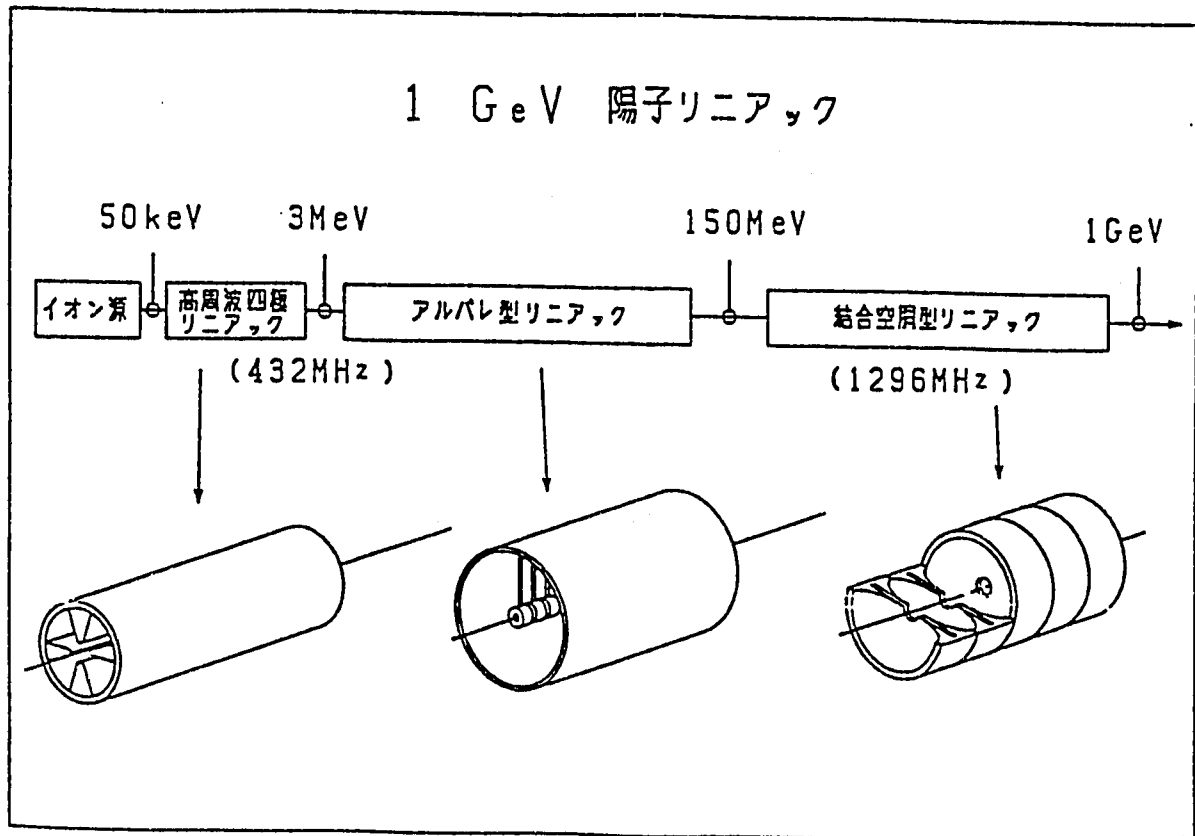
表 2.4 現状技術の整理

項目	現状性能	Present status of technique			
		実験用施設		実用炉	
		要求性能	実現見通し	要求性能	実現見通し
イオン源のフィラメント寿命	100 時間	1 日	○	1 年	▲
ビーム損失の低減	$\sim 10^{-4}$	10^{-5}	▲	10^{-5}	▲
非破壊ビームモニター 開発	開発中		△		△
CWRFQの開発	数mA	10mA	△	数10mA	▲
大電流DTLの開発	数mA	10mA	△	数10mA	△
大電流CCLの開発	1mA	10mA	△	数10mA	▲
大電力RF源の開発	市販品有り		○		○

○：現状技術で実現見通し有り

△：実現するにはR&Dを必要とする

▲：実現するにはかなりのR&Dを必要とする



陽子リニアックの基本スキーム

図 2. 1 陽子リニアックの基本スキーム⁽¹⁵⁾

A basic scheme of proton linear accelerator

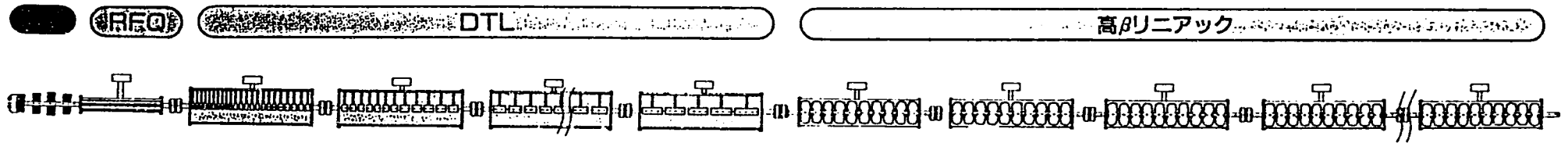


図 2. 2 加速器施設の基本構成の例 ⁽¹⁹⁾

An example of a basic structure of accelerator facility

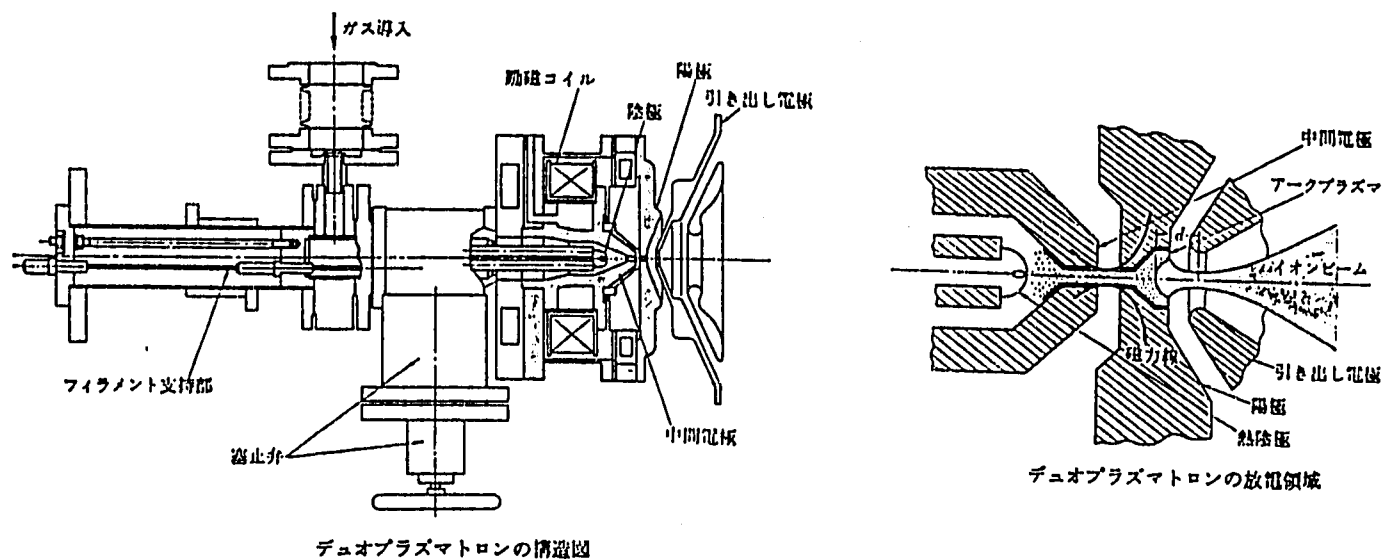


図 2. 3 デュオプラズマトロンイオン源の構造

(7)

A structure of Duoplasmatron ion source

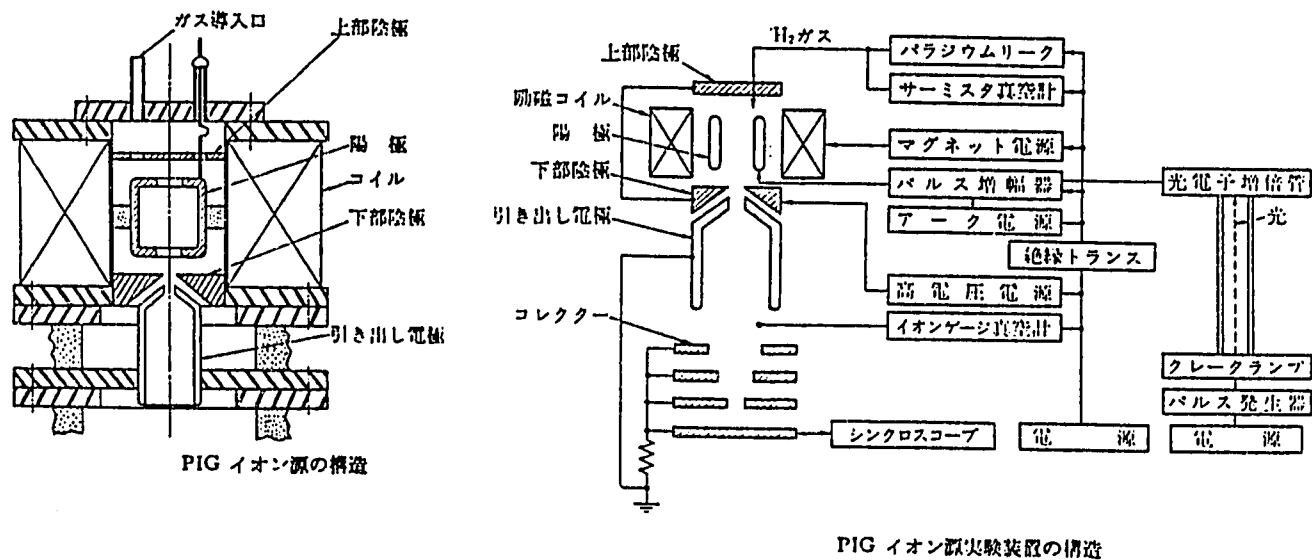


図 2. 4 P I G イオン源の構造⁽⁷⁾

A structure of PIG ion source

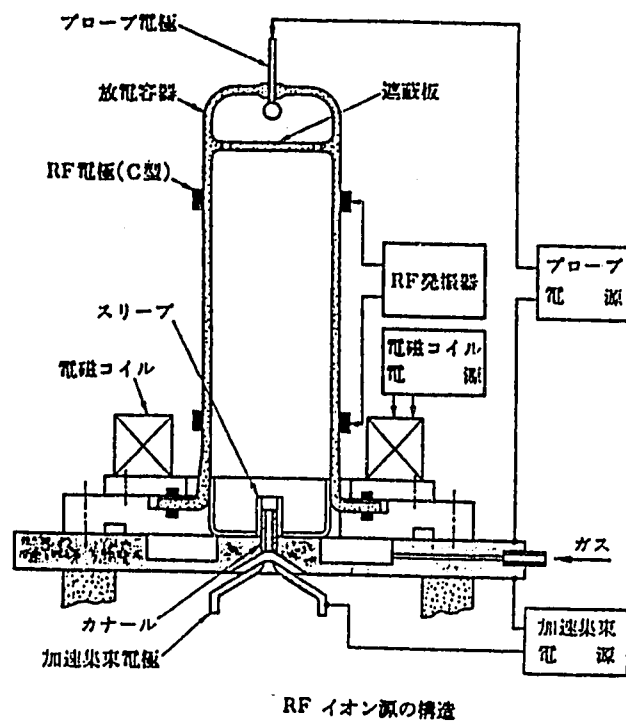
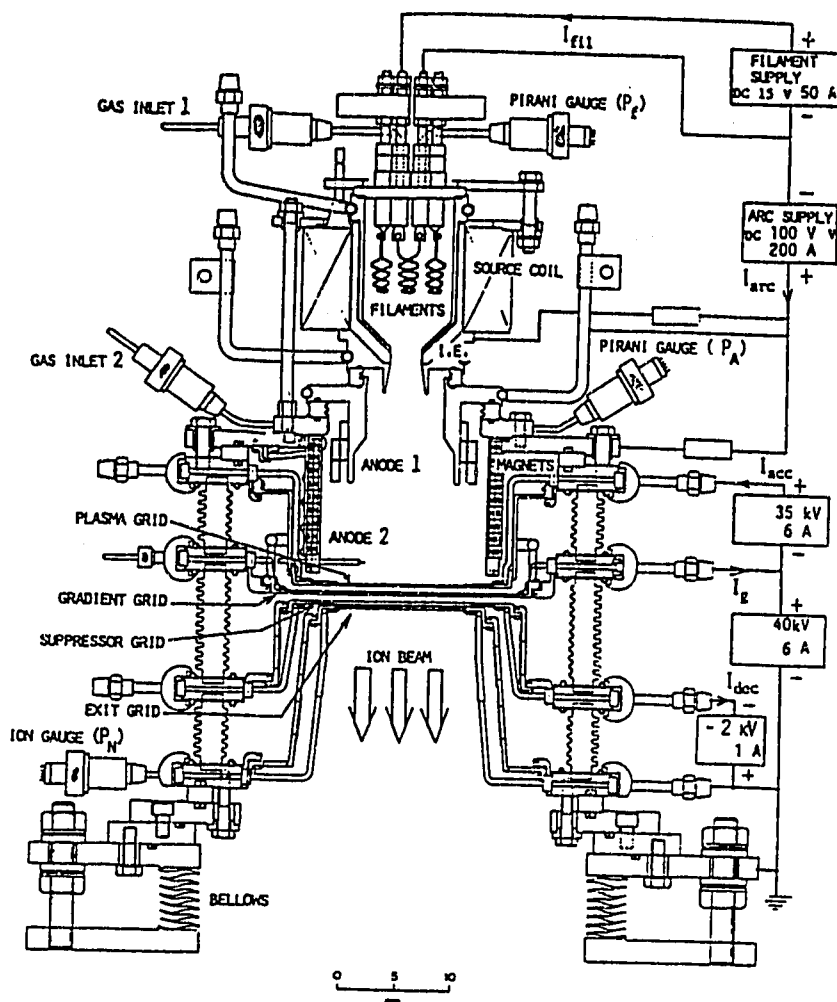


図 2. 5 RF イオン源の構造⁽⁷⁾

A structure of RF ion source



Cross-sectional view of the Long Pulse DuoPIGatron, which produces 70 keV, 5 A, 10 s hydrogen beams.

Typical characteristics of the Ion Sources for Fusion Application

	LONG PULSE DUOPIGATRON	JT-60 MULTICUSP ION SOURCE	HELIUM ION SOURCE	MULTI-AMPERE VOLUME SOURCE
SOURCE TYPE	MODIFIED DUOPIGATRON	MULTICUSP	MULTICUSP	MULTICUSP
ION SPECIES	H+	H+	He+	H-
BEAM ENERGY	70 keV	100 keV	200 keV	50 keV
BEAM CURRENT	5 A	40 A	3.5 A	7.8 A
CURRENT DENSITY	210 mA/cm ²	310 mA/cm ²	140 mA/cm ²	30 mA/cm ²
DURATION	10 sec	10 sec	0.1 sec	0.1 sec
BEAM DIVERGENCE	16 mrad	10 mrad*	3 mrad	10 mrad*

図 2. 6 デュオピガトロンイオン源の構造 (8)

A structure of DuoPIGatron ion source

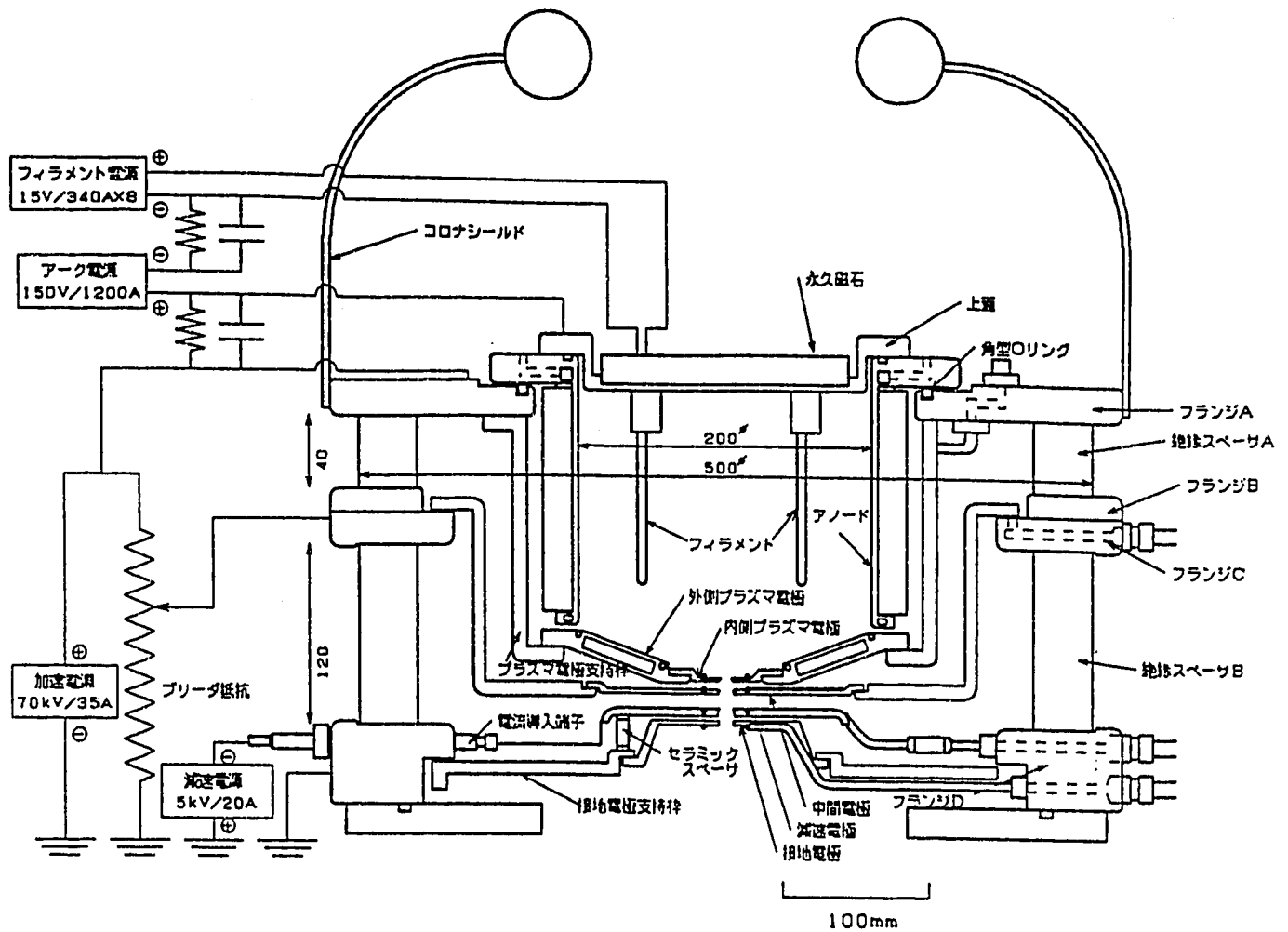


図 2. 7 多極磁場バケット型イオン源の構造 (6)

A structure of magnetic multipole bucket ion source

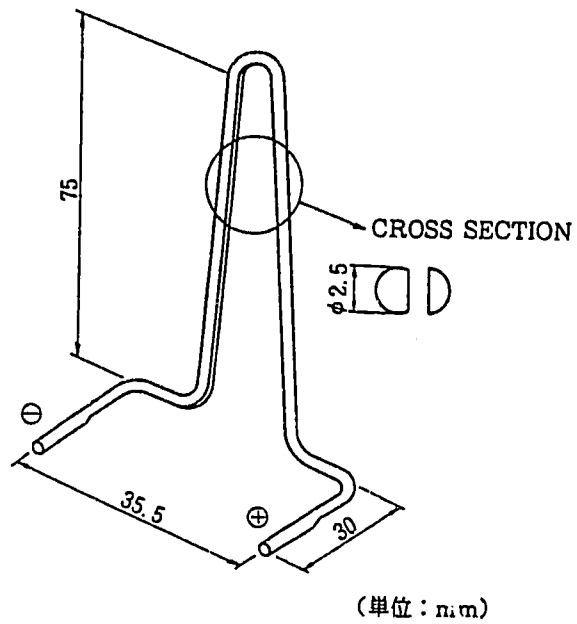
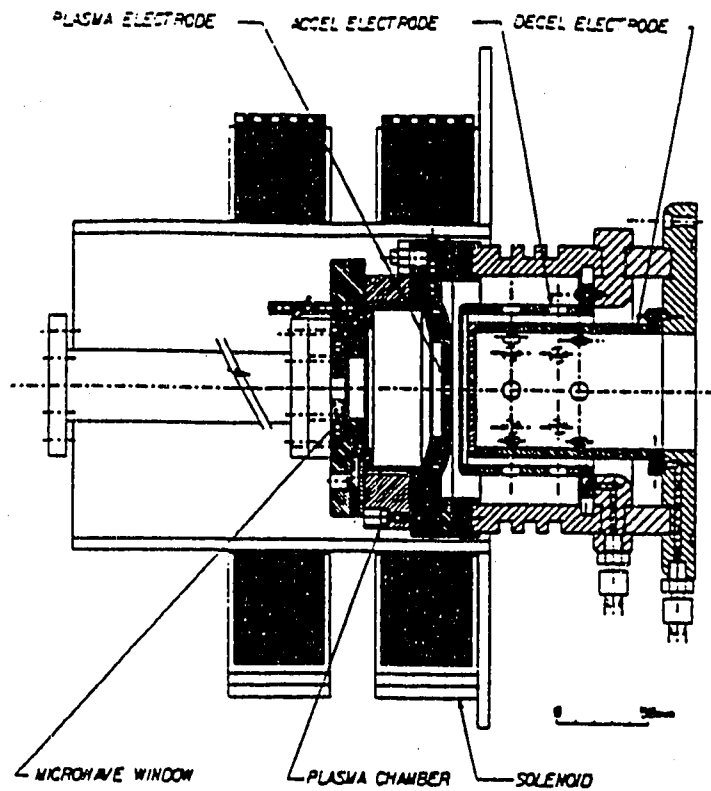
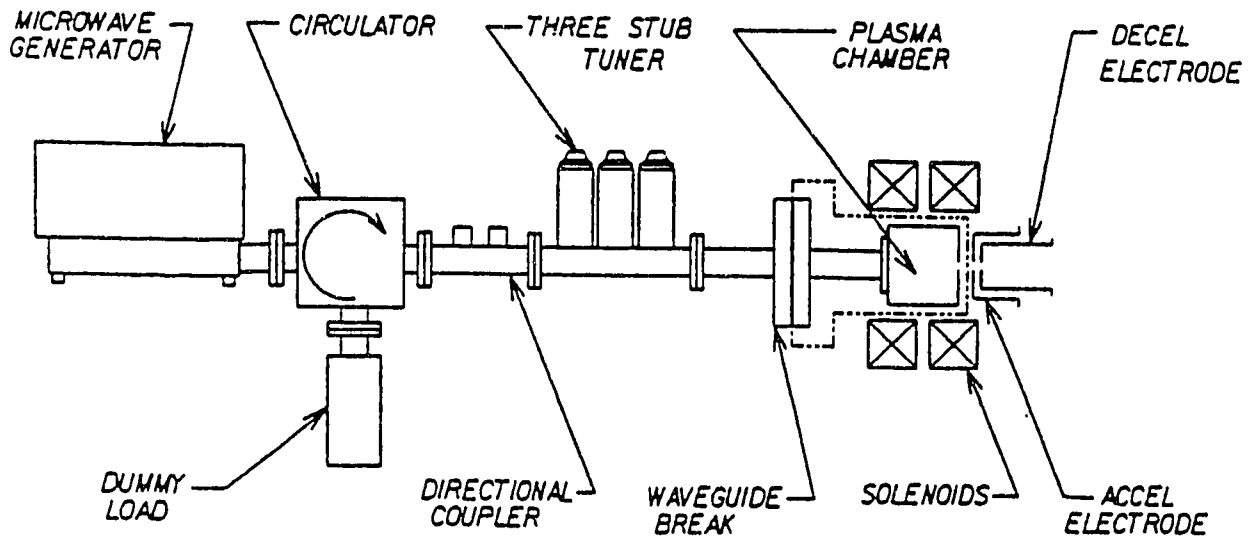


図 2 . 8 フィラメントの形状例 ⁽⁹⁾

An example of filament structure



Section drawing of the CRL ECR proton source.



Chalk River ECR ion source system. Only components enclosed by the dashed line are at high-voltage.

(10)

図 2. 9 ECR イオン源開発例 (CRNL)

An example of ECR ion source

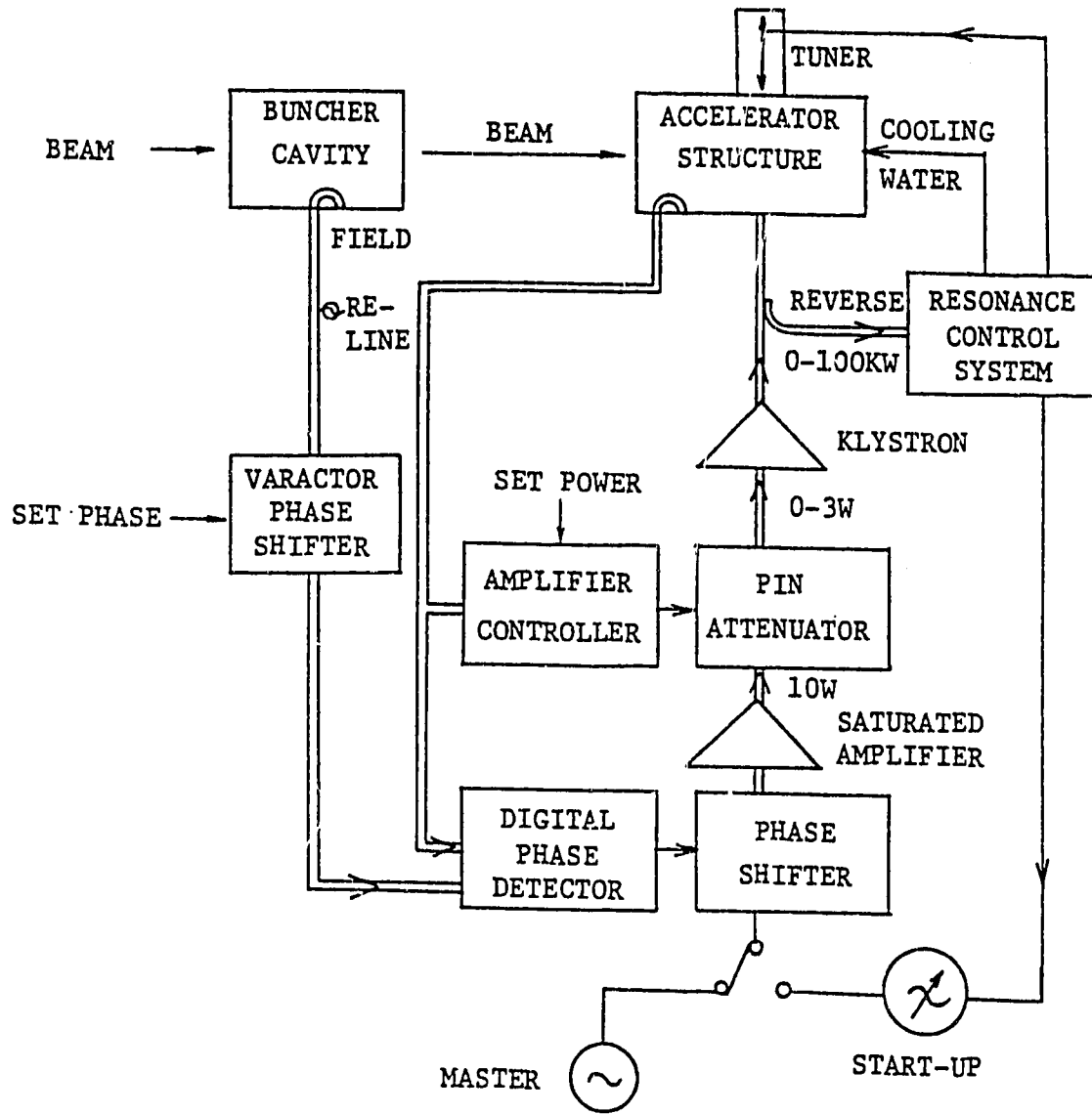
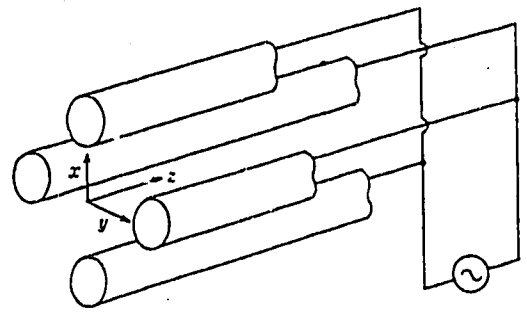
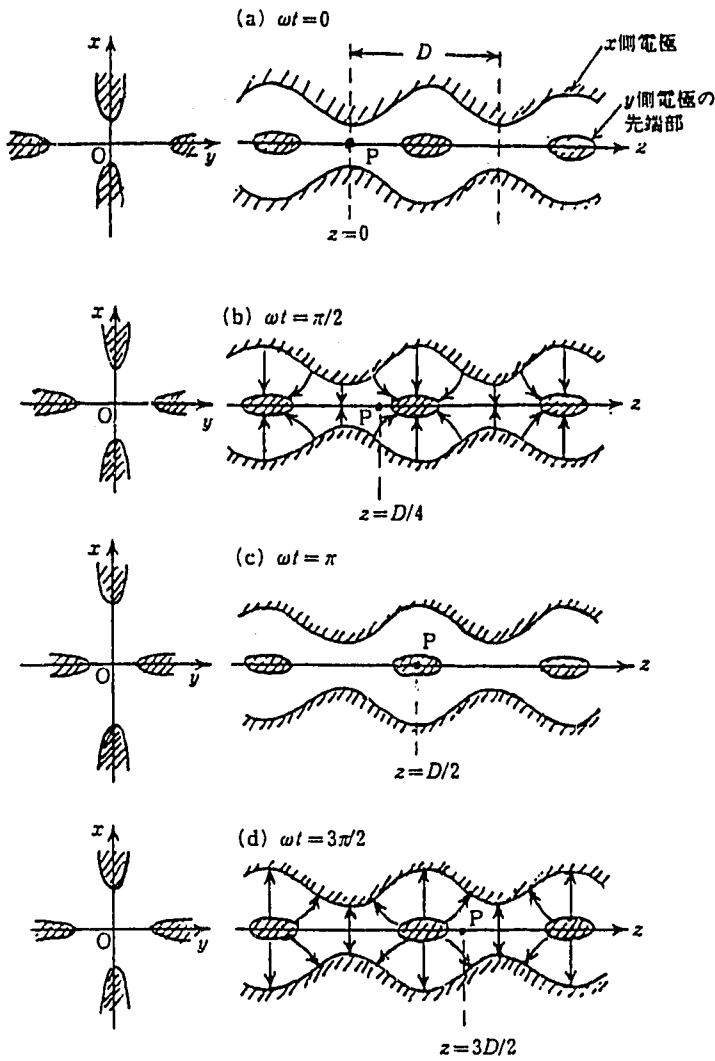


図 2. 1 0 加速器システムの計測・制御構成

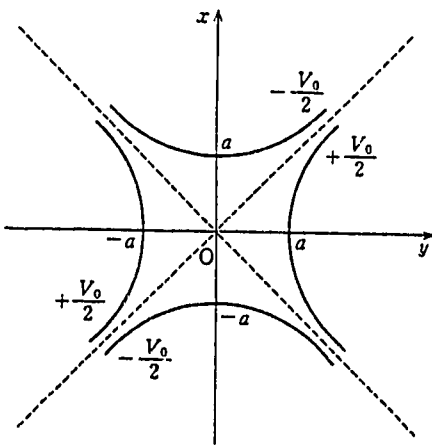
(25)

Measurement and control structures of accelerator system

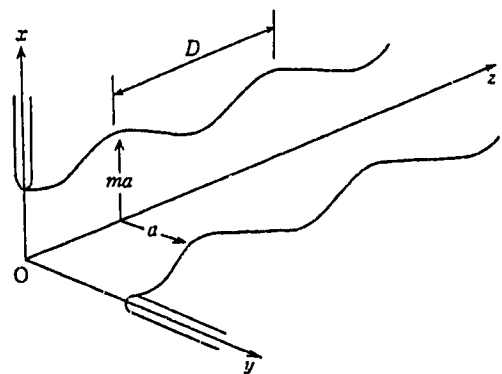


高周波四重極レンズ

RFQにおける集束と加速の原理



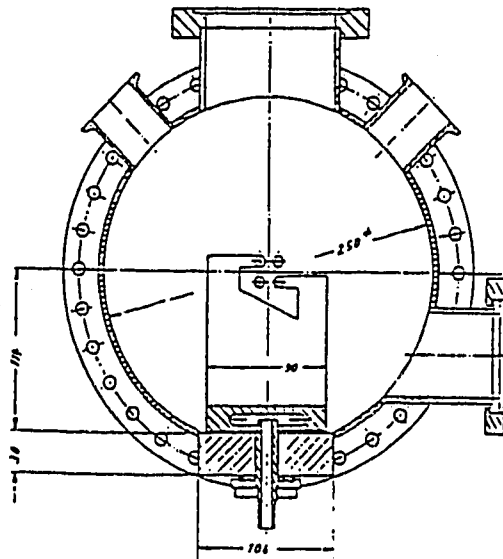
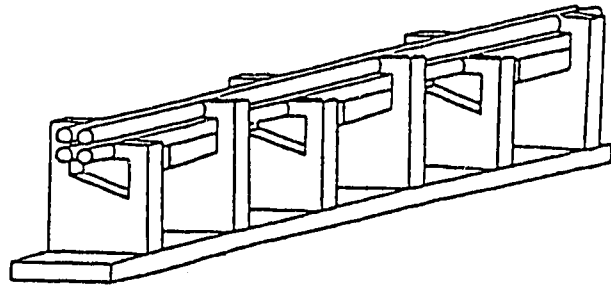
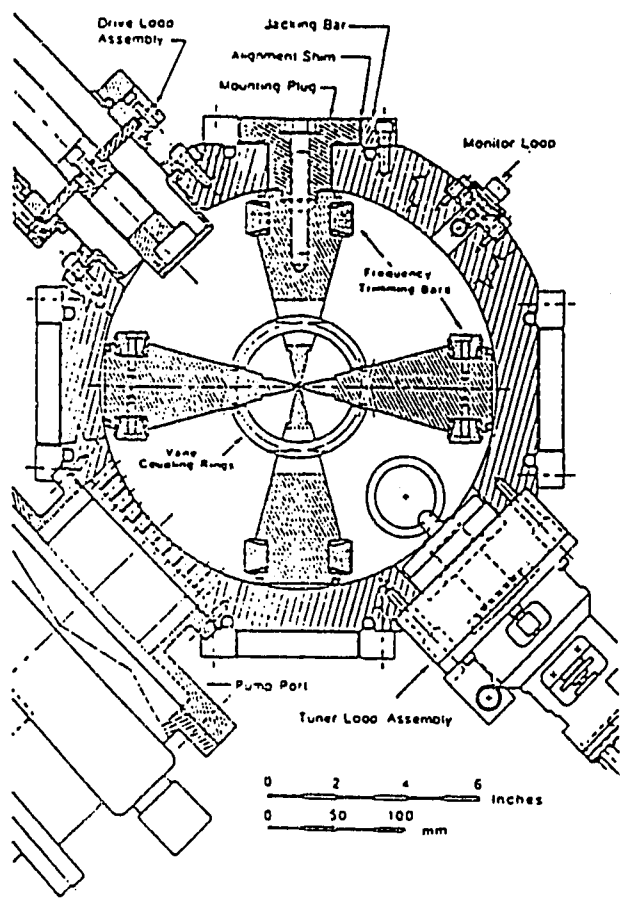
静電四重極レンズ



RFQの電極のモジュール
ション

図 2. 1 1 RFQの作動原理⁽²¹⁾

Working principle of RFQ

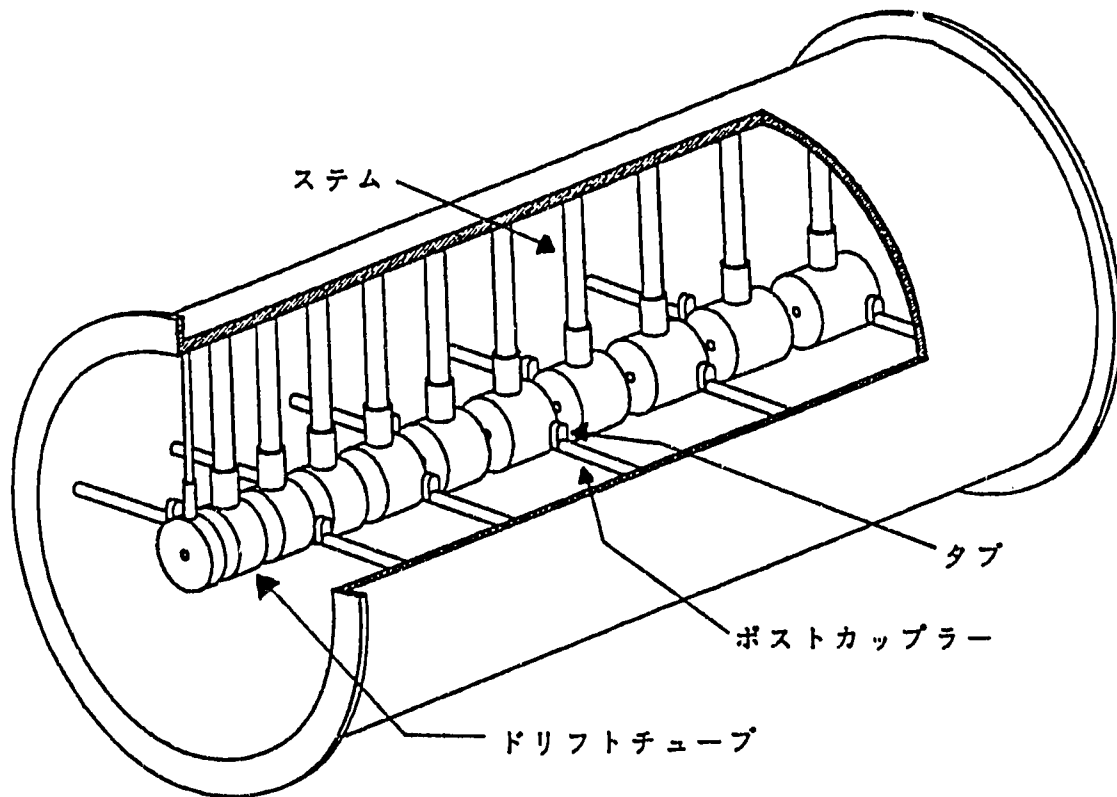


LBLで製作されたCERNの酸素イオン
加送用 203 MHz four-vane 型 RFQ

フランクフルト大学で試作
された「202 MHz HERA-Four-Rod-
RFQ」の0-mode- $\lambda/2$ Structure

図 2. 1 2 RFQ の構造概念⁽¹³⁾

Concept of RFQ structure



ドリフトチューブリニアック

図 2. 1 3 DTL の構造概念 ⁽²⁰⁾

Concept of DTL structure

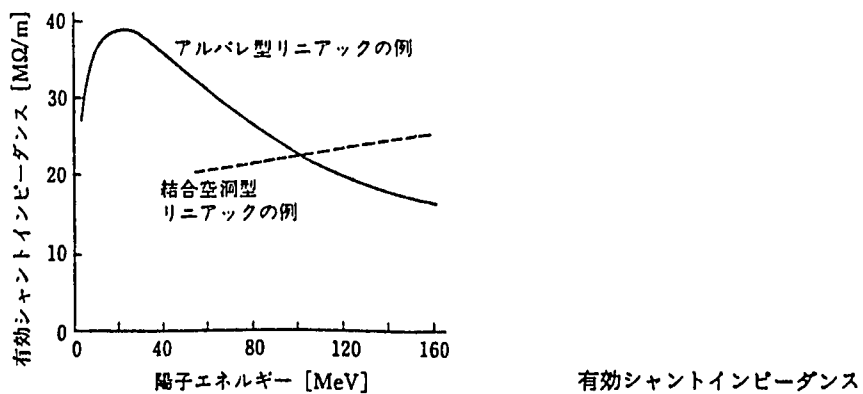
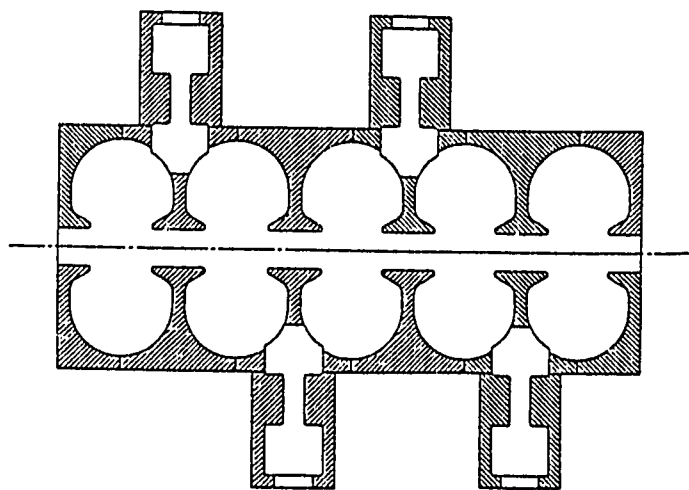


図 2. 1 4 シャントインピーダンスのエネルギー変化 ⁽²¹⁾

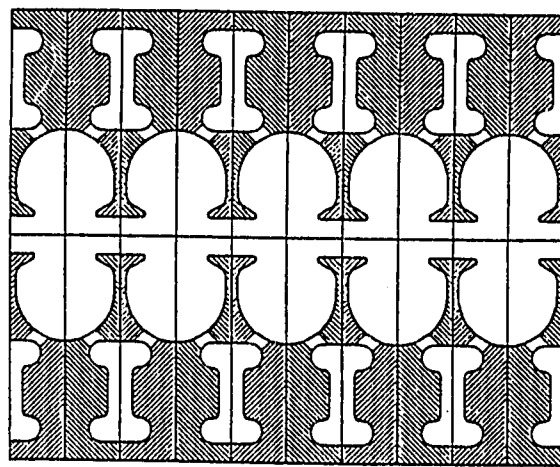
Energy change in the shunt impedance

Comparison of Shunt Impedance (ZT²)
for Various Linac Structures
(at $\beta = .456$, KE=116 MeV)

Structure	ZT ² (M Ω /m)	Remarks
DAW	38	Coupling 30-40%, good vacuum properties, most interfering modes
SCS	36	Good vacuum, satisfactory tuning, coupling typically a few % (<10%)
ACS	36	Poor vacuum, difficult tuning, good coupling. Dipole interfering mode
OAC	25	Poor vacuum, difficult tuning, moderate coupling
CCS	25	Poor vacuum, difficult tuning, good coupling



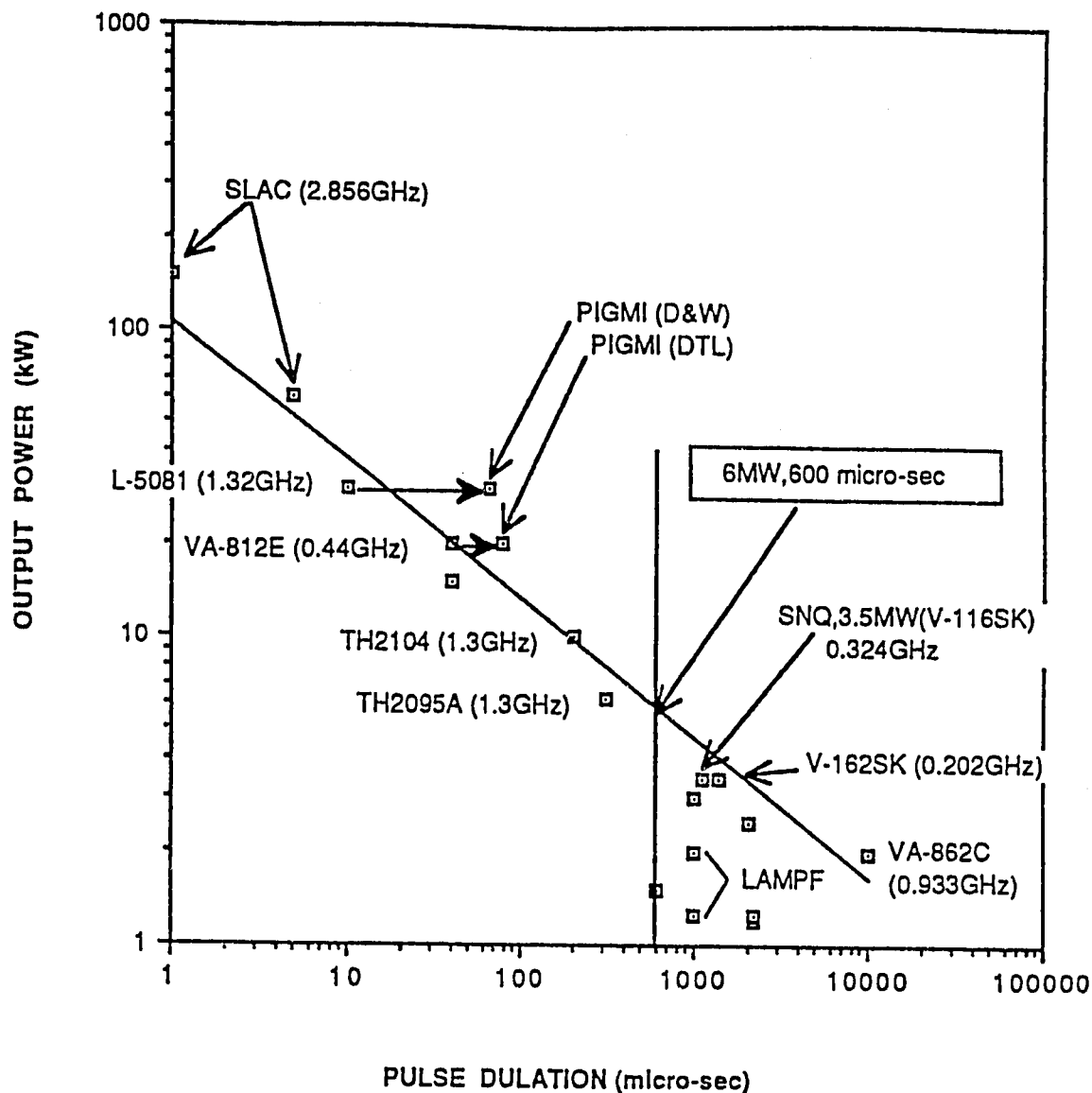
SCS



ACS

図 2. 1 5 C C L 加速空洞の比較 ⁽¹⁵⁾

Comparison of CCL acceleration cavities



現存するパルスクライストロンのピーク出力とパルス幅の関数

図 2.16 クライストロンの出力とパルス幅の関係 (15)

A relation between klystron output and pulse width

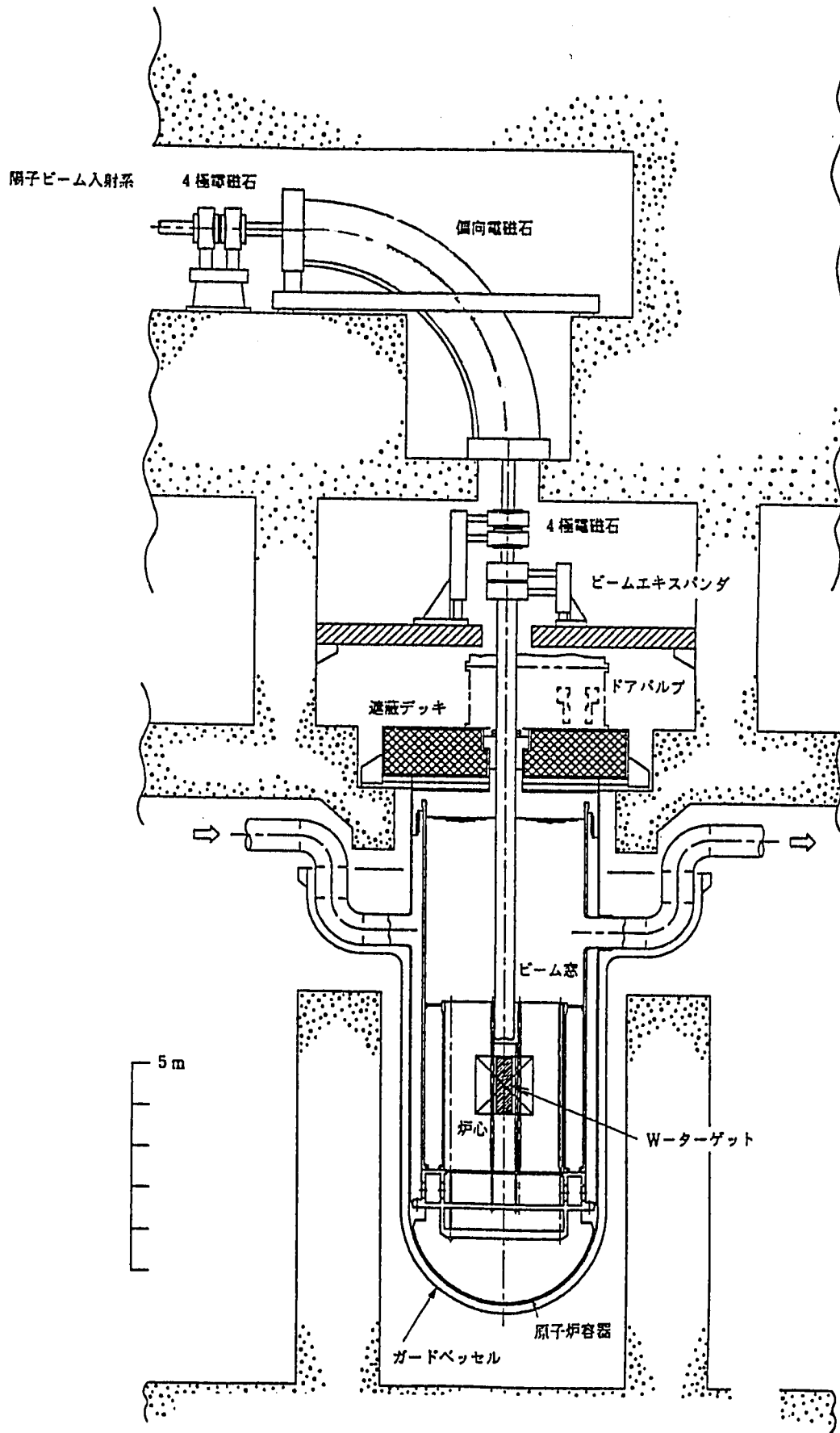


図 2 . 1 7 原子炉構造図 (23)

Reactor structure

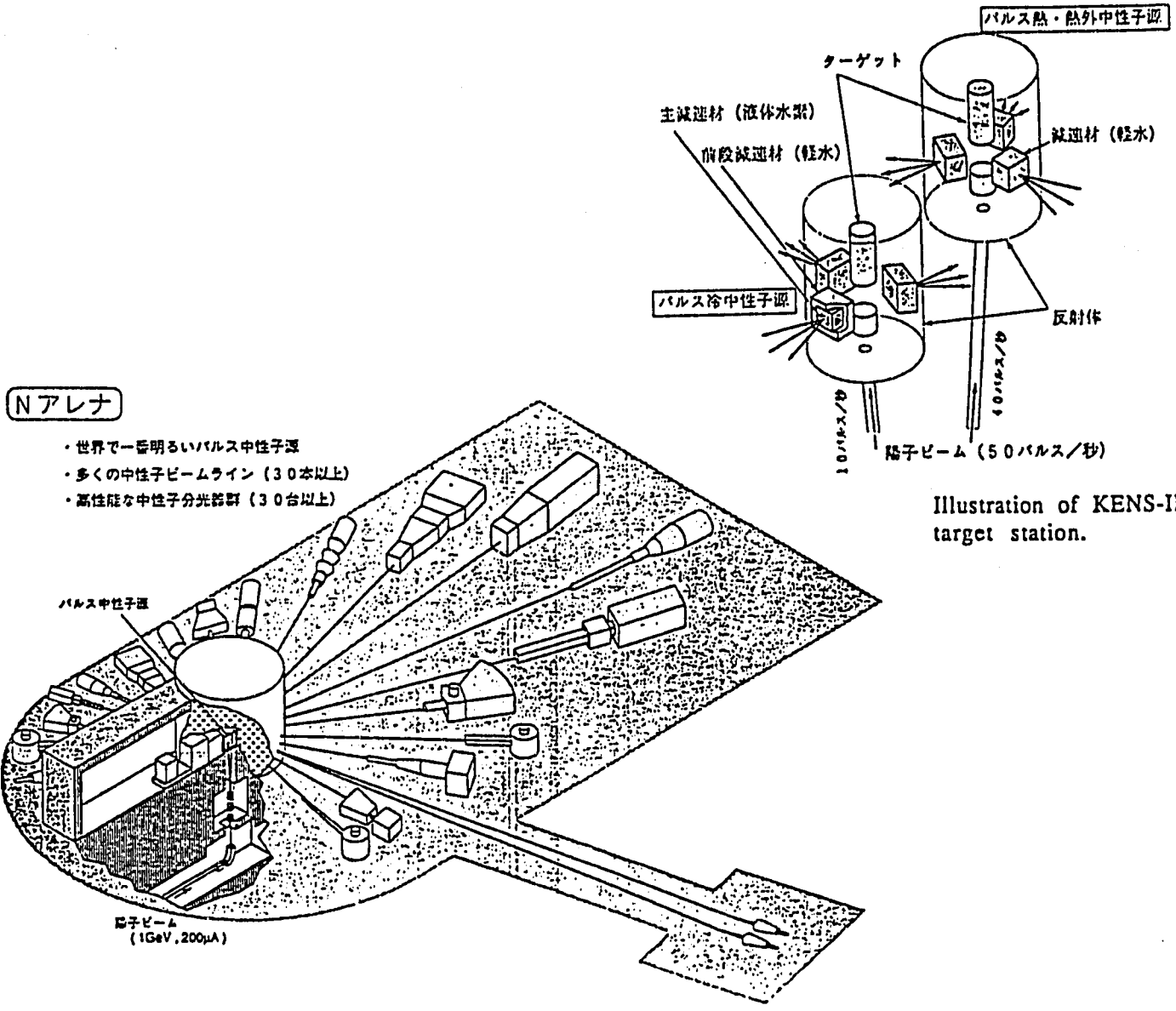


Illustration of KENS-II, target station.

Illustration of KENS-II, target station.

図 2 . 1 8 ビームの入射方向の例 (22)

An example of beam injection direction

ИТЕР

- 38 -

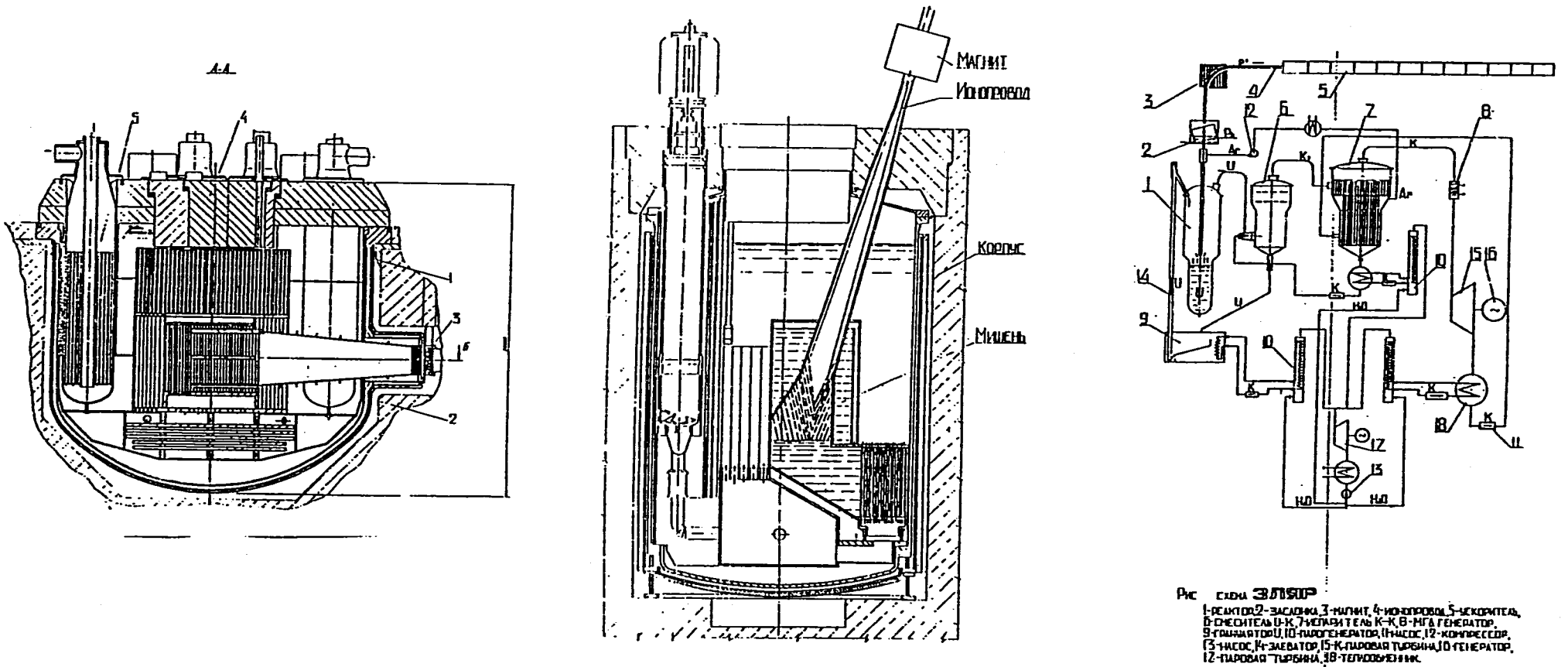


Рис. схема ЭИТЕР
 1-реактор 2-защита 3-магнит 4-индуктор 5-секторная
 6-дисконтая 7-к-7-мелкая т.е.а.с. 8-к-к-в-н.г.а. генератор
 9-фильтрация 10-парогенератор (и насос) 12-компрессор
 13-насос 14-запор 15-к-паровая турбина 16-генератор
 17-паровая турбина 18-тепловыделитель

図 2. 19 ハイブリッド炉の概念 (ロシアの例)⁽¹⁶⁾

Concept of hybrid reactor (Russia)

3. 未臨界炉に関する課題の検討

3.1 燃料及び炉心

3.1.1 ピンバンドル型燃料

プルトニウムとウランの混合酸化物（MOX）燃料については常陽、もんじゅの実績があり、ピンバンドル型燃料の製造方法は特に課題はない。但し、Am、Np等のTRU燃料の場合には、発熱やガンマ線放出量が大きく、燃料製造工程での除熱、遮蔽対策などの課題がある。一方、金属燃料についてはANLで製法が検討されプルトニウムやウラン合金について見通しが得られている。但し、AmやNpの合金に関しては酸化物燃料と同様に除熱、遮蔽対策の解決が必要である。

燃料製造の方法については遮蔽や除熱の対策に課題があるものの、方向が定めれば対策は見い出せると考えている。

3.1.2 TRU(MA)のインベントリの確保

ハイブリッド炉でTRU消滅を行う場合、TRU(MA)の初期インベントリとして、約3トンが必要とされている。LWRでのTRU生成量は100万kWe当たり年間約26kgである。国内に40基分として年間約1トンである。現時点までに累積10トン程度が存在している計算になる。また、TRU群分離の計画は、初期インベントリを確保することを念頭に見通しを立てておく必要がある。ハイブリッド炉での消滅処理を実用化するには、TRUの群分離が実現していることが前提となる。

常陽などで消滅処理の実験を行う為のインベントリ確保の見通しについても、同様である。仮にドライバー燃料の殆どをTRU燃料として照射試験を考えるのであれば、初期インベントリとして数100kg程度のTRUが必要となる。10年程度の期間に試験の実施を考えるのであれば、ペレットやせいぜいピン単位の照射試験が現実的であり、燃料集合体単位での照射を想定する場合には、TRU燃料の製造方法を具体化しておかないとTRUインベントリを必要量確保することが困難となる。ハイブリッド炉の計画推進においては、TRUを用意する為の計画と整合した計画が必要である。

3.1.3 被覆管材料選択

現状想定している未臨界炉の概念では、陽子ビームは炉心燃料に直接照射されるこ

とがなく、ターゲットを直接的に照射するため炉心燃料にとっては通常の原子炉と比べて特に大きな差異はない。すなわち、高速炉の開発で開発中の被覆管の材料を用いることが可能である。別の角度からすると、被覆管の選択に伴う照射量の制限にあわせて、炉心の寿命を設計することが要求されるが、炉心設計での制約条件にはなるもののハイブリッド炉の成立性に影響する問題ではない。

3.1.4 燃焼欠損反応度の制御

ハイブリッド炉の未臨界度が浅く、実効増倍率が0.98よりも大きい場合には、燃焼による反応度の変動により臨界を超過する恐れがある。未臨界状態を常に維持できるようにするためには、実効増倍率は0.95未満とすることが望ましい。浅い未臨界度で運転ができればメリットが大きいので反応度制御系（通常の原子炉における制御棒）を設けることも一つの解決方法として考えうる。未臨界炉としての安全上のメリットとのバランスで考える必要がある。

3.1.5 熔融燃料

熔融塩炉を用いたハイブリッド炉のシステム構成を図3.1に示す。熔融塩炉心は過去にORNLで研究が行われた経緯がある。国内では熔融塩炉心の経験が十分ではなく、基本的なところからの研究開発が必要と考えられる。特に、以下の項目について検討を必要とする。

- ・ 熔融塩炉の基本システム構成

- 1次系基本構成概念や炉出力と熱交換器の容量の設定

- ・ 熔融塩炉の流路構造の設定方法

- 冷却材の流入方式

- ・ 熔融塩炉の上部構造の取り外し方法

- ビームダクトの撤去の要否や手順

- ・ 高温シールの方法

- 1次系バウンダリーの設定

- ・ 構造材と熔融塩との共存性

- 熔融塩材料の選定と1次系機器の材料選定

- ・燃料交換方法

- 燃料交換手順、概念の設定

- ・化学処理プロセス

- 熔融塩としてのTRU供給方法や熔融塩からTRU、消滅廃棄物の分離方法

3.2 ターゲット

3.2.1 ターゲットの構造

ターゲットは高エネルギー陽子の照射によるスポレーション反応で大量の中性を発生させることが要求されている。ターゲット部での中性子発生密度を平坦化させたり、除熱性能を向上させるなどの設計上の要求を満たす必要から、その構造についての工夫が必要である。そのため、これまでに、ピンバンドル型や積層板型のターゲットが提案されてきている。前者についてはピン形状の選択、後者についてはフローホールの形状により冷却性能が決定されるが、それら性能の最適化などを各種試験を通じて行う必要がある。

3.2.2 ターゲットの交換

ターゲットは、放射線損傷等から寿命があり交換が必要となる。ターゲット交換の手順は、基本的には燃料交換と同様である。但し、ビーム導入の案内管がターゲットの直上に位置するため、交換に際しては、案内管の撤去が必要になるなど、交換手順を煩雑にしないための工夫が必要となる。これらの、撤去や交換の方法は高速炉の炉内構造物の交換において検討されており、ハイブリッド炉の成立性に対して致命的な問題となることはない。

3.2.3 ターゲット部の最適化設計

ターゲット部での中性子発生密度を平坦化させると同時に、除熱性能を向上させる等の設計上の最適化検討が必要である。構造を工夫すればターゲット内の発熱密度は、除熱が可能な程度にターゲットの大きさを変え、ビーム径を拡大することで調整可能となる。発熱密度が数 $100\text{W}/\text{cm}^3$ を越えないようにすれば除熱は可能である。ターゲットの中性子発生分布は炉心性能に影響を与える為、最適化の検討は入念に行う必要があるもののハイブリッド炉の成立性を左右する問題ではない。

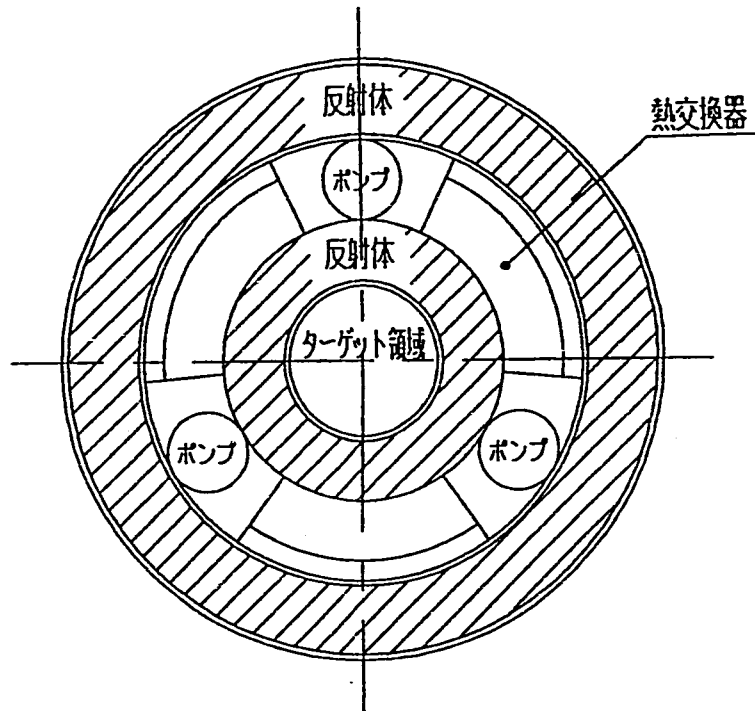
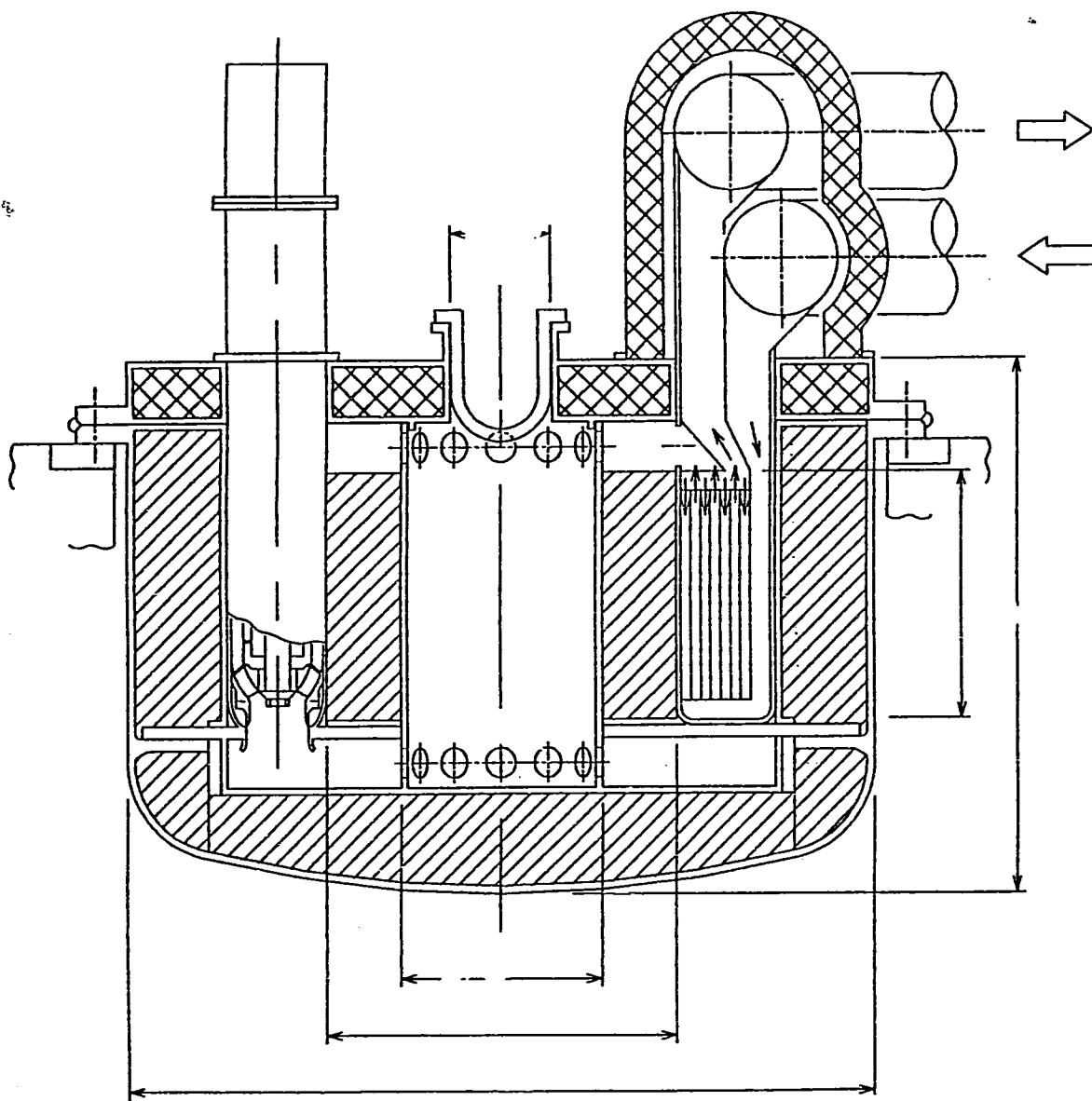
3.3 反応度のモニターの開発

未臨界度が浅い状態で未臨界炉としての安全上の利点を生かすためには、未臨界度の常時監視が行われている必要がある。許認可上、未臨界性の担保が必要となるとすれば未臨界度の制御やモニターの方法を確立しておく必要がある。再処理施設の臨界監視用にORNLでミハルゾー法未臨界度モニターが開発されているが、⁽¹⁸⁾ハイブリッド炉の監視用には確立できていない。現在までのところ、適切な未臨界度モニターが開発されていない上に、今後も見通しが立っていないところを考えると、許認可上未臨界性の監視が不必要と判断できる程度に十分深い未臨界度(0.95未満)でハイブリッド炉を運転することが必要と考える。

3.4 高エネルギー中性子の遮蔽対策

スポレーション反応で生成する超高エネルギー中性子(数10MeV以上の成分)は、透過力が強いので発生割合が少ないものの遮蔽上の影響は大きいと予想されている。原子炉からの漏洩中性子は数100keV程度のエネルギーであるが、1桁減衰させるのにコンクリートが30cm程度が必要であるが、数100MeVの中性子では1m程度が必要となる。そこでは、中性子の方向依存性が大きく、特に入射ビームの前方方向について大きく、必要となる遮蔽厚がコンクリートで10m程度になりそうである。このため厚い遮蔽コンクリートを設置する配置上の問題や、コンクリート壁の冷却が課題となると予想される。原子炉プラントの設計経験からするとかなりの遮蔽対策が必要であると考えられるが、原子炉容器まわりの配置を工夫することや、アクセスルートの工夫などで負担を軽減することで対応可能と考える。

但し、常陽のような既存プラントの改造の場合には、遮蔽上の制約でハイブリッド炉としての性能の上限が決定されることがありうるので検討の際にきめ細かい配慮が必要である。



溶融塩反応槽概念図

図 3 . 1 溶融塩炉の構成 (24)

Structure of molten salt reactor

4. お わ り に

本章では、検討した各項目についての開発課題を整理する。

加速器部分

(1) 加速器システム構成

- ・ビームロスの低減や加速器施設の全体コスト低減など加速器システムの最適化の検討が検討課題である。

(2) イオン源

- ・実用ハイブリッド炉を目指すためには、イオン源の寿命を1年間以上とするのが課題であり、そのためにはフィラメントの寿命を1年間以上に長寿命を達成するか、フィラメントを用いないECRイオン源等の方式の開発が必要である。
- ・実験用ハイブリッド炉に対しては、現状のイオン源寿命（100時間程度）を考慮して、複数個のイオン源を併用する等の方法により対応可能である。

(3) 高周波四重極型リニアック（RFQ）

- ・10%以上の高デューティーで平均数10mAのビーム電流を加速できることの実証を行う必要があり、加速管の除熱性能の確保が課題である。

(4) ドリフトチューブ型リニアック（DTL）

- ・10%以上の高デューティーで平均数10mAのビーム電流を加速できることの実証を行う必要があり、収束用電磁石の製作性や加速管の除熱性能の確保が課題である。

(5) 結合空洞型リニアック（CCL）

- ・加速効率の良い、加速管構造の選択を適切に行うことが課題であるが、そのためにモデル試験を行うなど基礎的検討が必要である。超電導空洞の採用等の選択上の検討を含め加速空洞の基礎試験を行う必要がある。

(6) 高周波（RF）源

- ・市販品の中から適当なものを見つけうるので開発要素は特に大きくない。製作コストの低減や、長寿命化等改良が当面の課題となる。

- (7) ビームラインと配置上の干渉
 - ・設計上は重要な課題であるが特に開発要素はない。
- (8) 磁石・機器類の放射化、損傷対策
 - ・想定される照射条件に見合った、放射化や照射損傷のデータを蓄積するべく試験計画を立案して置く必要がある。
- (9) ビーム窓
 - ・想定される照射環境に耐えるビーム窓の材料選択が課題である。当面、照射試験の計画を具体化しておく必要がある。

未臨界炉部分

- (1) ピンバンドル型燃料
 - ・TRUを含んだ燃料の製造上に課題があるので燃料製造方法を検討しておく必要がある。
- (2) ターゲット
 - ・ターゲットの形状の最適化、材料の選定、交換方法等を設計上の課題がある。
開発課題としては、ターゲットとして用いる材料の照射データの蓄積や中性子発生量などの核データの取得である。
- (3) TRU(MA)のインベントリ
 - ・ハイブリッド炉の計画推進と整合したTRUインベントリーを用意する計画を立てておく必要がある。
- (4) 被覆管材料
 - ・高速炉の燃料被覆管の開発と同様の課題であり、ハイブリッド炉固有の課題ではない。
- (5) 燃焼欠損反応度の制御
 - ・安全指針等の検討とあわせて考えてゆく必要がある。
- (6) 反応度のモニター
 - ・精度良い未臨界度のモニターの開発の見通しができていないので、未臨界度の監視を必要としない方向で安全シナリオを構築しておくことが必要である。

(7) 高エネルギー中性子の遮蔽

- ・ 炉心からの漏洩中性子の量を適切に評価するとともに、超高エネルギー中性子の透過挙動を適切に評価できる手法の確立が必要である。

実験用施設として既存の原子炉を用いる場合には遮蔽の追加などを考える必要がある。

(8) 熔融燃料

- ・ 熔融塩炉心について材料物性の収集など基礎的な研究開発が必要である。

尚本報告書の作業は、新型炉技術開発株式会社横堀 仁氏に御協力頂いたので、ここで謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 金子他：“大強度陽子加速器計画”、JAERI-M91-095 (1991)
- (2) D. C. Hagermann "The Status of LAMPP" Proc. 1976 Proton Linear Accelerator Conf. AECL5677, p12(1976)
- (3) R. L. Gullickson "Accelerator Requirement for Strategic Defence" Proc. 1987 PAC IEEE Conf(1987)
- (4) E. D. Bowmann, et al. "Nuclear Energy Generation in a Waste Transmutation using an Accelerator -Driven Intense Thermal Neutron Source" LA-UR-91-2601 (1991)
- (5) E. D. Bowmann, et al. "Spallation -Based and Technology and associated Nuclear Data Requirements" Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research -Evolution by Accelerator (1990)
- (6) 小栗英和、他 "技術開発用加速器(BTA)用の高輝度水素イオン源の開発" JAERI-M 92-200(1992)
- (7) 熊谷寛夫 "実験物理学講座28加速器" (共立) (1975)
- (8) Y. Okumura "Review of the High Current Ion Sources for Fusion from a View Point of Accelerator Applications" The 2nd Int. Symposium on Advanced Nuclear Energy Research(1990)
- (9) 奥村義和 "大面積イオンビーム源" 機能材料7月号(1989)
- (10) G. M. Arbique, et al. "High-Current Direct Injection to a CWRPQ Using an ECR Proton Source" 1992 Linear Accelerator Conf. (1992)
- (11) R. J. Macek "Lessons from Shielding Retrofits at the LAMPP/LANSCE/PSR Accelerator, Beam Lines and Target Facilities" OECD Documents Proc. of the Specialist Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, Arlington (1994)
- (12) M. Mizumoto, et al. "High Intensity Proton Accelerator for Nuclear Waste Transmutation" Proc. LINAC Int. Conf., Ottawa (1992)

- (13) K.Hasegawa, et al. "R&D Status on the High Intensity Proton Accelerator in JAERI"
JAERI-Conf 95-021(1995)
- (14) N.Ito, et al. "Fabrication and Test s of the DTL Hot Model in the R&D Works for the Basic Technology Accelerator(BTA) in JAERI", 1994
International Linac Conference Tsukuba (1994)
- (15) JHP-10 KEK Internal 88-8, "大型ハドロン計画陽子リニアック ワーキンググループ報告"
(1988)
- (16) I.Kh. Ganev et al. "Linac-Driven Plutonium Breeder Target-Blanket Physical Parameters" Specialist's Meeting on Accelerator-Based Transmutation" PSI
(1992)
- (17) H.Nakasima, et al. "Benchmark Problems for Intermediate and High Energy Accelerator Shielding" JAERI-Data/Code 94-012 (1994)
- (18) J.T.Mihalcz, et al. "Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium-252" N. S. E:66, p29(1978)
- (19) 日本原子力研究所パンフレット,"OMEGA計画大強度陽子加速器"
- (20) JHP-14 KEK Internal 90-16,"大型ハドロン計画陽子リニアック ワーキンググループ報告Ⅱ"(1990)
- (21) 亀井亨、木原元央,"パリティー物理学コース加速器科学" (丸善)
- (22) 渡辺昇,"スポレーションを用いた高性能中性子源の開発"核分裂と核破砕の物理と工学専門研究会(京都大学原子炉実験所)(1990)
- (23) 動燃報告書 PNC PN9410 95-072、加速器・ハイブリッド炉検討、1995年4月、大坪 章 他。
- (24) 西田雄彦,"加速器による消滅処理"第26回炉物理夏期セミナー消滅処理研究(1994)
- (25) G. E. McMichael, et al., "Beam Loading Experiments with a Side-coupled Structure" Proc. 1979 Linear Accelerator Conf. BNL 51134, p.180 (Montauk 1979)
(1979)

付録（略語集）

ACS(Annular Coupled Structure)
APT (Accelerator Production of Tritium)
ATW(Accelerator Transmutation of Waste)
CCL(Coupled Cavity Linear Accelerator)
CRNL(Choke River National Laboratory)
CW(Continuous Wave)
DAW(Disk and Washer)
DTL(Drift Tube Linear Accelerator)
ITEP(Institute of Theoretical and Experimental Physics)
LAMPF(Los Alamos Messon Physics Factory)
LANL(Los Alamos National Laboratory)
LBL(Lawrence Berkley Laboratopry)
NBI(Neutral Beam Injection)
ORNL(Oak Ridge National Laboratory)
OAC(On Axis Coupled Structure)
PS(Proton Synchrotron)
PSI(Paul Scherrer Institute)
RFQ(Radio Frequency Quadrupole Linear Accelerator)
SCS(Side Coupled Structure)
SDI(Strategic Defence Initiatives)