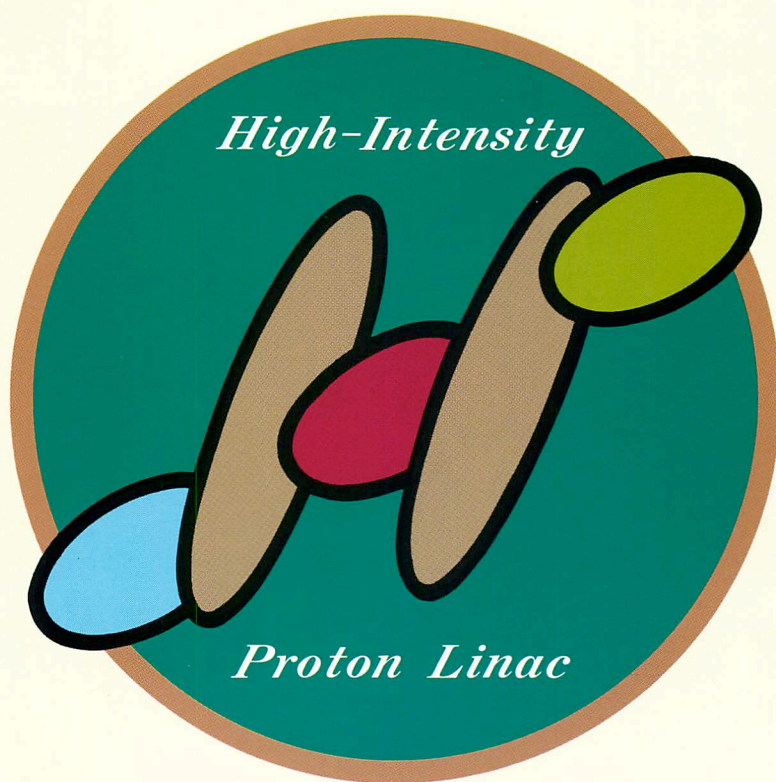


大強度陽子線形加速器試験装置

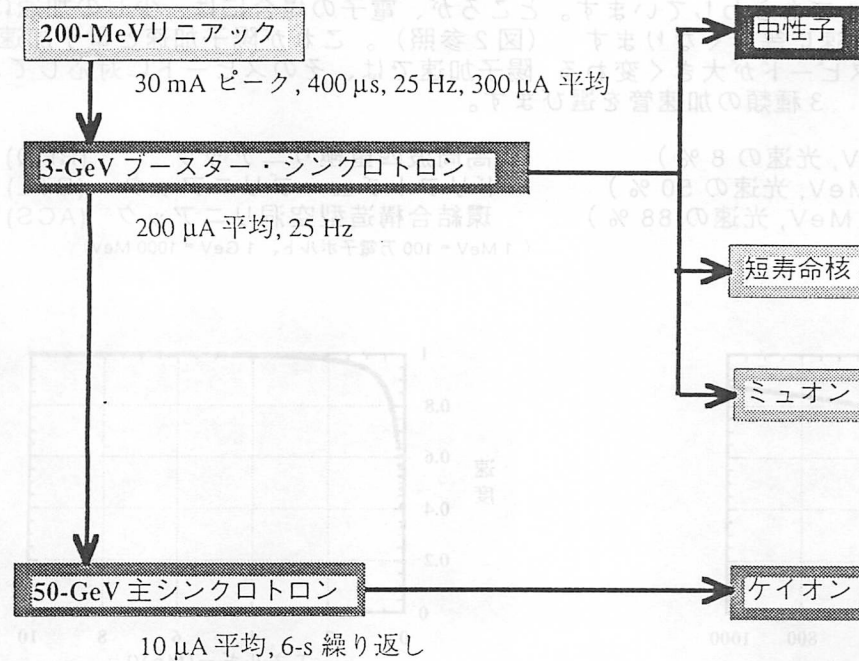


- ◎公開時間 : 午前9時～午後4時30分
- ◎場所 : アセンブリホール
- ◎所要時間 : 約15分

見学コース及び各装置の概要は、次頁をご覧ください。

陽子加速器群

実験室群



(中性子はその名の通り電氣的に中性なので、荷電粒子や光のように電子に邪魔されずに、物質中の原子核に静かに肉迫できる。しかも、質量が原子核と同じくらいなので、物質中で自然に起こる振動などを励起することができる。そのため、生命体をも含む広い範囲の複雑な物質の性質を解明するのに極めて有力な手段である。)

(地球上には自然に存在しない寿命の短い原子核を作りだし、イオン化して加速。星の中や宇宙空間で起こる原子核反応を実験室で実現する。)

(電子に非常に似ているが、質量が大きいので、電子などを放出して崩壊し、物質中で検出可能。そのため、物質の性質の解明に有効。)

(「奇妙さ」という新しい自由度を原子核内に導入し、原子核内の深いところの構造を解明する。その他、原子核、素粒子物理に多くの応用が可能。例として、ケイオン稀崩壊、ニュートリノ振動など。)

(A : アンペア、電流の単位 s : 秒 Hz : ヘルツ、1秒間の繰り返し数 m : ミリ、千分の一 μ : マイクロ、百万分の一)

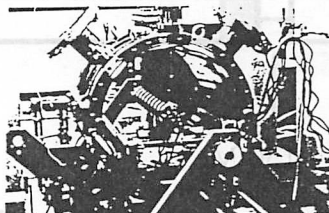
世界最強の加速器には、世界最高の技術開発

高エネルギー大強度陽子ビームの加速

- 放射化を避けるためのビームの高品質化 (細い、平行度のよいビーム)
 - ビーム力学の理論的研究
 - 対称性のよい、誤差の少ない加速収束電磁場を作り出すための開発研究
- 加速の高効率化
- 安定で、信頼性の高い高周波源

ドリフト・チューブ・リニアック DTL (150 MeV まで)

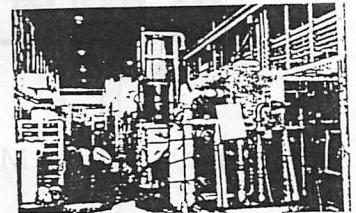
- 高効率の加速管
- 高精密な収束磁場
- 均一な加速電場



高周波源の開発

(600 μs, 50 Hz では世界最高の 5.5 MW 高周波源開発に成功)

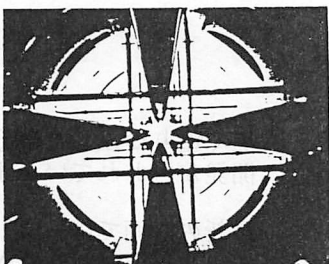
ACS 用



高周波四重極リニアック RFQ

(3 MeV まで)

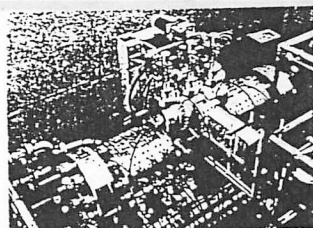
- πモード安定化ループの発明 (本所)
- RFQで西側最高エネルギー、世界タイ記録達成 (本所)



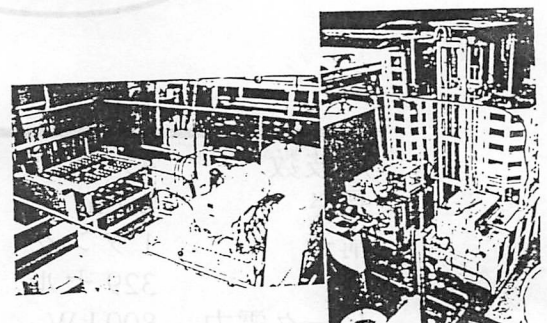
環結合構造型空洞リニアック ACS

(150 MeV 以上)

- 高効率
- 軸対称な加速電場
- 均一な加速電場 (初めて本所で実用化)



RFQ, DTL 用



大強度高エネルギー陽子リニアック

加速して陽子のエネルギーを高くしても、そのスピードはなかなか光速に近づきません（図1参照）。図では、光速（30万km/秒）を1であらわしています。ところが、電子の場合には、少しの加速により、そのスピードはほとんど光速に等しくなります（図2参照）。これが陽子加速と電子加速の重要な違いです。加速途中でスピードが大きく変わる陽子加速では、そのスピードに対応して、加速の効率が最大になるように、3種類の加速管を選びます。

- * 低エネルギー領域（～3 MeV, 光速の 8 %）
- * 中エネルギー領域（～150 MeV, 光速の 50 %）
- * 高エネルギー領域（～1000 MeV, 光速の 88 %）

高周波四重極リニアック (RFQ)
 ドリフトチューブリニアック (DTL)
 環結合構造型空洞リニアック (ACS)
 (1 MeV = 100 万電子ボルト、1 GeV = 1000 MeV)

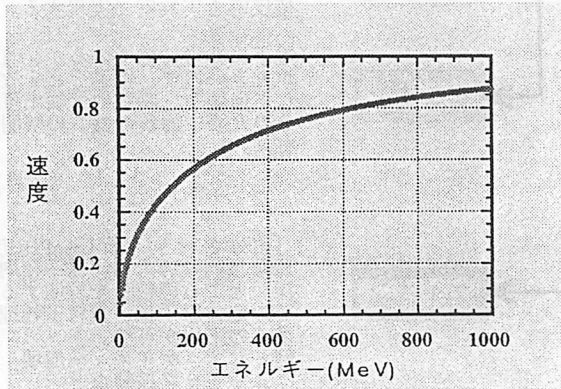


図1 陽子の速度とエネルギーの関係

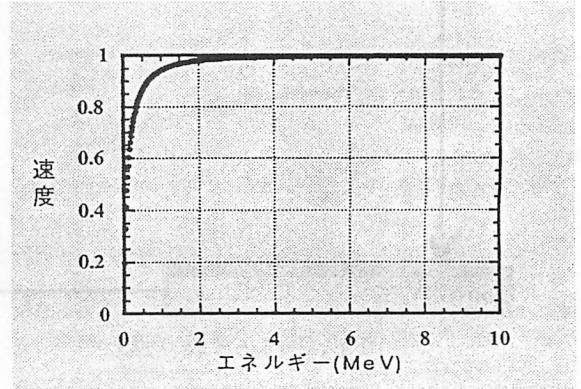
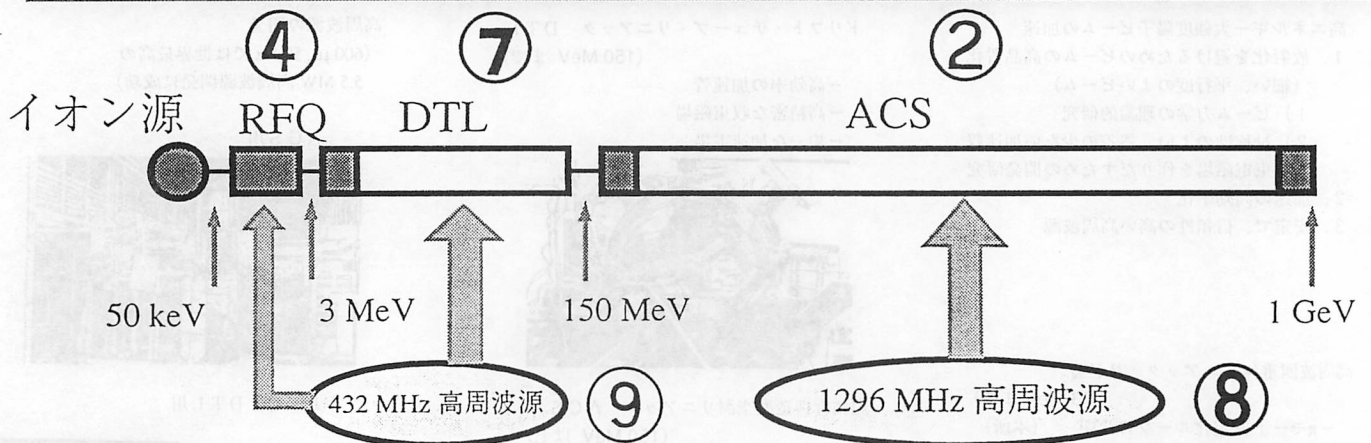


図2 電子の速度とエネルギーの関係

1 GeV（10 億電子ボルト）陽子リニアックの構成



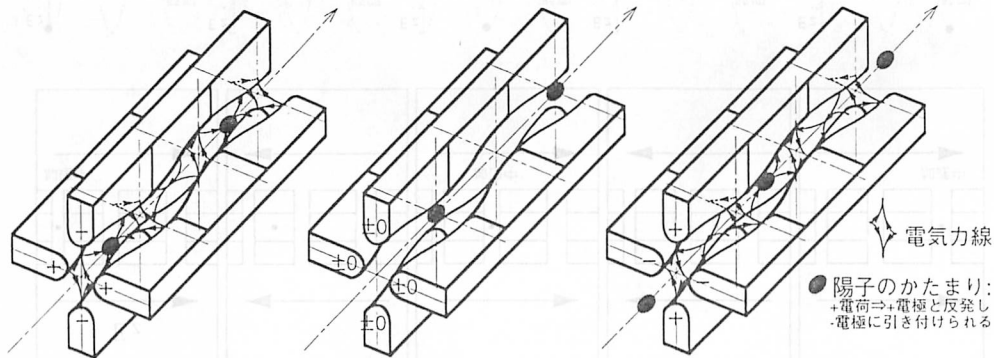
	RFQ	DTL	ACS
周波数	432 MHz	432 MHz	1296 MHz
長さ	2.7 m	79 m	411 m
構造	1 タンク	13 タンク	152 タンク
	329 セル	342 セル	3576 セル
ピーク電力	800 kW	9 MW	82 MW

黒く塗りつぶした部分の開発が行われています

最新の計画では、エネルギーは 200 MeV までとなっています

高周波四極線形加速器：RFQ
(Radio Frequency Quadrupole LINAC)
(1)RFQ加速の原理とビームが加速される様子

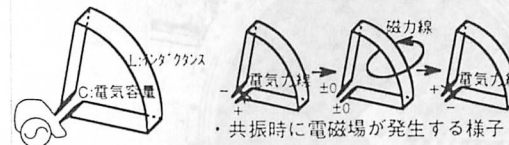
従来、陽子線形加速器の初段には、コックロフト・ワルトン型加速器(CW)が使用されてきた。この方式では、非常に高い電圧で陽子を加速するので、空気中での放電の問題から最大電圧が750kV程度に制限される(陽子1本あたり=750keV)。RFQは、CWに替わる方式として1974年で発案された。低速荷電粒子の集束装置として使用されてきた高周波四極の電極に共振周波数と呼ばれる波形を加工することにより、ビーム軸方向の電場も生成し、集束と同時に加速を行う。本RFQに入射された1本あたり=50keV(速度=光速の1%)の陽子は、3MeV(3000kVの電圧で加速した1本あたり=速度=光速の8%)まで加速される。



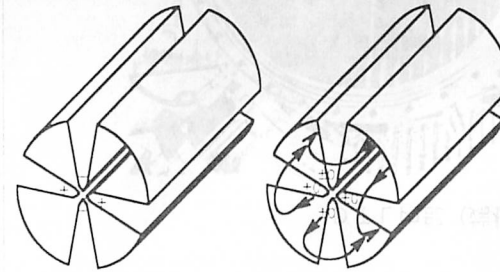
- 1) 水平電極+電位&垂直電極-電位
水平方向収束&垂直方向発散力
- 2) 水平垂直電極とも0電位の
時に山の上を通過(力無し)
- 3) 水平電極-電位&垂直電極+電位
水平方向発散&垂直方向収束力

図1 RFQ加速の原理: +電極の山から-電極の山へ電気力線が走り、軸方向の加速電場が発生する
* 減速電場も周期的に発生するが、陽子のかたまり(バンチ)をうまく生成し、陽子の速度に応じて波形を加工することにより、陽子が加速電場のみを受けるように製作している。

高周波四極線形加速器：RFQ
(Radio Frequency Quadrupole LINAC)
(2)RFQ電場生成の原理とRFQの写真



- 1) 銅板を図の様に加工すると共振器ができる。
共振周波数 $f = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$



- 2) 1)を四回対称に接続し、延長することにより、4つに四回対称なRFQ空洞を作ることができる。
* 右図に示す様に、磁力線は空洞内に閉じ込められ、隣合う1/4空洞内には逆向き磁力線が発生する。

図3 RFQ電場生成の原理

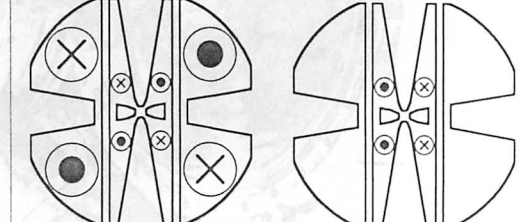
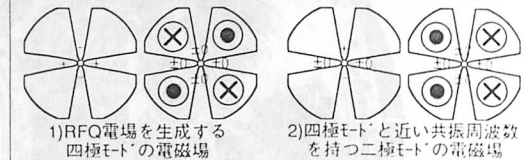


図4 電場安定化方法PISL(πモード安定化ループ)の原理
(4つに四回対称なRFQには、加速に使用する1)の四極モードの他に2)の二極モードが存在し、これらの共振周波数が近いと混合が生じやすく加速効率が劣化しやすい。本RFQでは、16箇所(3)4)に示す様に電極に孔を開け棒を設置することによりPISL(棒の外側の閉ループ)を形成して電場を安定化している)

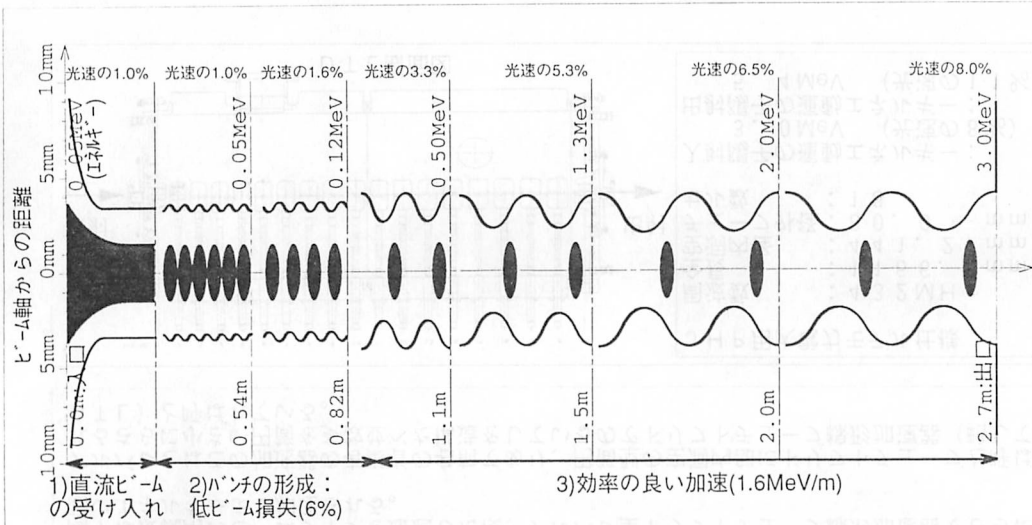
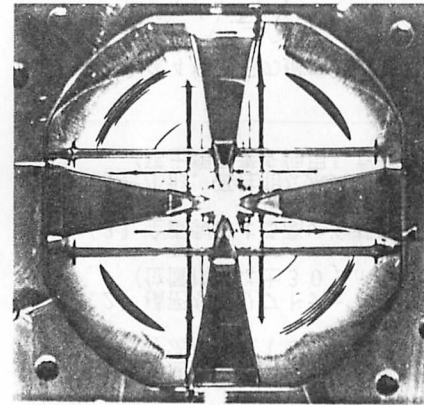
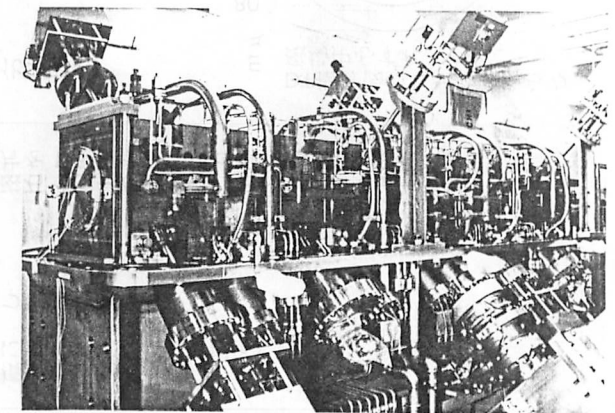


図2 RFQ内で陽子ビームが加速される様子
1) ビーム軸と電極の距離を徐々に小さくすることにより、入射時の電場の位相によらず全ての陽子が平均として同じ集束力を受けるようにでき、直流ビームの受け入れが可能。
2) 波形を徐々に大きくすることにより、ビームの輝度を悪化させずに、約94%の高い捕獲効率で陽子のかたまり(バンチ)を形成できる。ここ迄の1m、陽子はあまり加速されない。
3) 形成された陽子のかたまりを効率良く加速する(この1.7mで2.75MeV加速: 1.6MeV/m)。



RFQ空洞内部の写真
(ビーム入口側の端板を外して撮影)

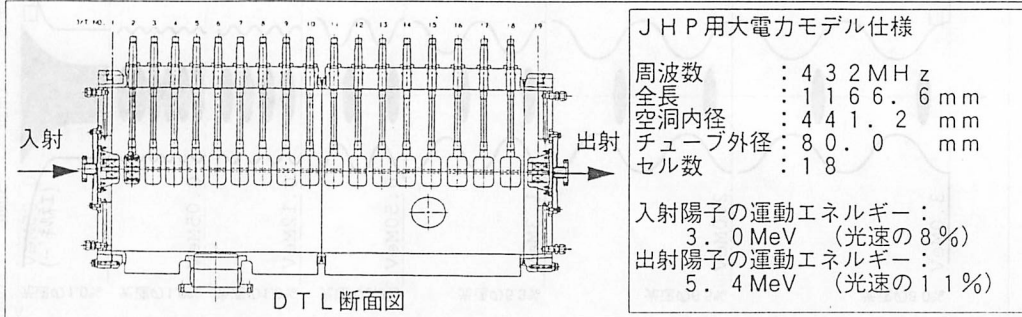


真空容器内に設置されたRFQ空洞の写真
(真空容器上蓋を外して撮影)

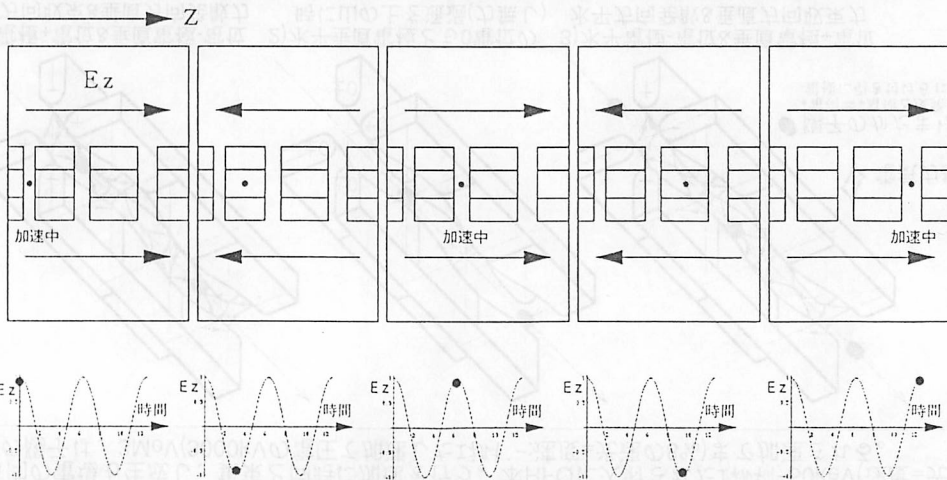
アルバレ型ドリフトチューブ線形加速器 (DTL)

RFQで連続ビームからバンチしたビームにされ、かつある程度のエネルギーまで加速された陽子は接続用のビームラインを通過した後、アルバレ型ドリフトチューブ線形加速器でさらに高いエネルギーまで加速される。

アルバレとはこの加速器の考案者の名前であり、円筒型の空洞内部にドリフトチューブと呼ばれるさらに小さい円筒を多数並べた構造をしているのでドリフトチューブ線形加速器(略してDTL)と呼ばれている。



加速原理. 陽子がDTL内部で加速される様子を図に示す。全体で高周波の2周期分である。(図中の矢印は電場の向きを示す。減速する方向に電場がある時は陽子はドリフトチューブの中に隠れている)



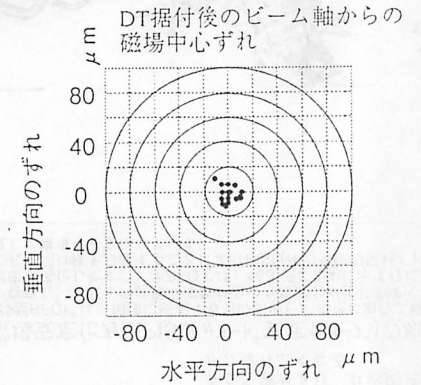
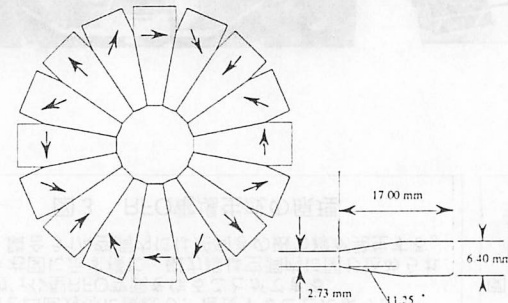
効率. 陽子の速度が大きくなるほど、ドリフトチューブの長さが長くなり加速効率が下がる。従って通常は陽子の運動エネルギーが100~200MeV位になるまでDTLで加速し、それからは別の形式の加速器に移行する。

1 GeV陽子線形加速器の計画では150MeVで次の型式の線形加速器になる。

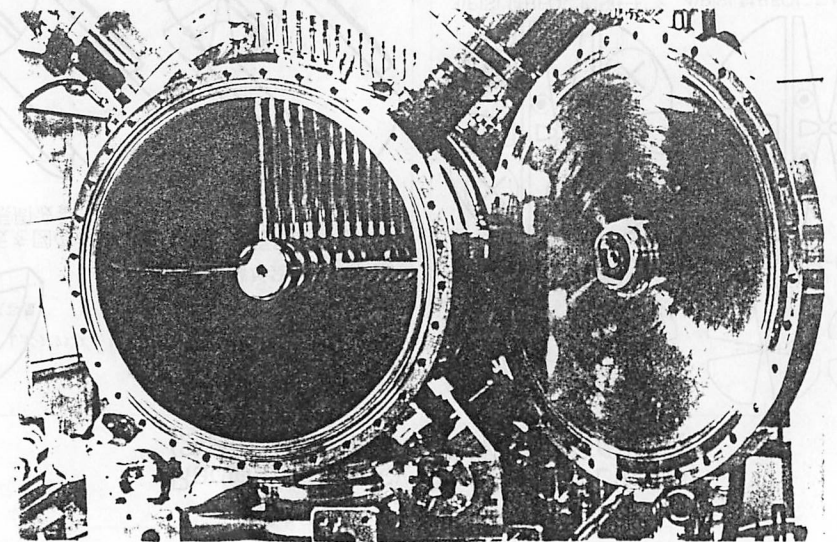
JHP用432MHz DTLの特徴

- (1) 加速器の各構成要素を高い加工精度で製作。
(寸法精度数10 μm未満、場所によっては10 μm以下)
- (2) 精密なドリフトチューブの据えつけ位置精度。
(位置精度は±30 μm以下)
- (3) 全銅製による高い冷却効率。
- (4) 小形、高性能な永久磁石製4極磁石(ビーム収束用)をドリフトチューブ中に内蔵。
(稀土類元素を使用した永久磁石片を16個組み合わせる1組の4極磁石を製作)

永久4極磁石の構成図(矢印は磁化の向き)



DTL内部(端板を開けた状態)



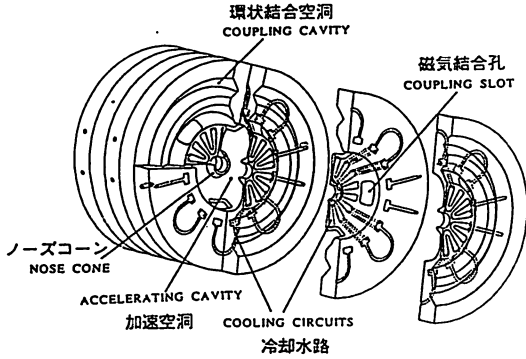
環結合型加速構造

Annular Coupled Structure

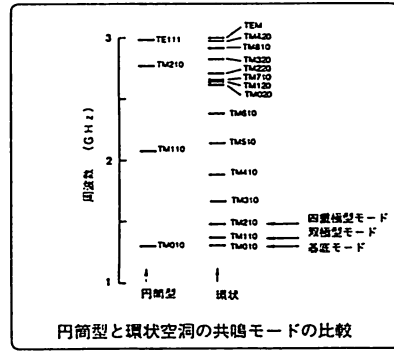
高周波加速空洞とは、電磁波のエネルギーを効率よく荷電粒子（陽子、電子等）の運動エネルギーに変換する装置である。

ここに展示してある装置は、環結合型加速構造と呼ばれ、陽子の運動エネルギーが 150 MeV 以上（陽子の速度が高速の 50% 以上）の領域で使用される線形加速装置である。本装置の特徴は、比較的高い加速効率と歪みの少ない加速電場を両立させていることである。

加速構造の特徴と高周波特性



環結合型加速構造では、加速空洞と環状結合空洞が交互に配置されている。このような周期構造は二重周期構造と呼ばれ、電磁波の安定的伝播を保つために必要不可欠である。

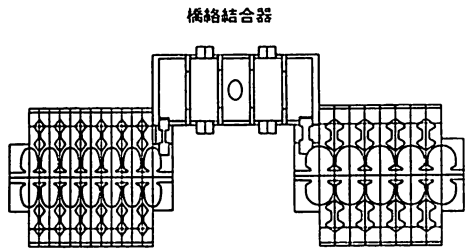


環状空洞では、基底モードのすぐ上に双極型等の高次モードが隣接している。このため、環状空洞の軸対称が磁気結合孔等によって破れた場合、基底モードが高次モードの影響を受けて歪みやすい。

本加速構造では、4個の磁気結合孔を90度毎に配置することによって、基底モードの歪みを抑えている。

電力試験空洞

低β型と高β型の二種類の試験空洞が製作され、各空洞とも定格電力の1.5倍まで問題なく機能することが実験により確認された。



低β用7セル試験空洞

高β用5セル試験空洞

主要諸元表

運転周波数 1296 MHz
パルス幅 600 μs
パルス繰り返し 50 Hz

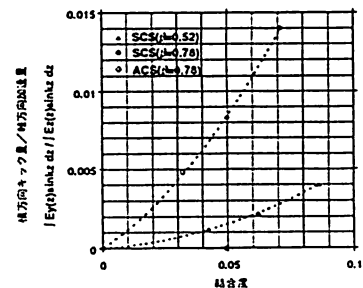
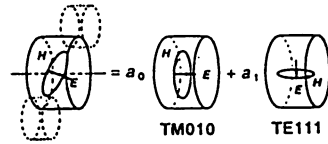
	低β型	高β型
β (= 陽子の速度 / 光速)	0.52	0.78
加速電場 (MV/m)	3.0	3.5
高周波電力尖値値 (kW/セル)	1.8	2.6
空洞間の結合度	0.052	0.056
シャント抵抗値 (MΩ/m)	30	42
Q値	1.5 × 10 ⁴	1.9 × 10 ⁴

磁気結合孔配置と加速電場の歪み

加速電場の歪みはビームの質を低下させる。環結合型構造は軸対称性に優れていて、加速電場の歪みは非常に小さい。

この点について、現在広く使用されている側結合型と比較してみよう。

側結合型とは、円筒型結合空洞を下図のように加速空洞に横付けした構造をしている。側結合型の磁気結合孔の配置は、軸対称な基底モード (TM010) に双極モード (TE111) を混入させる。このため、加速電場は空洞の軸に対して傾き、ビームを横方向に振ってしまう。



加速電場の傾きによってビームが横方向に受けるキック量を結合度（磁気結合孔の大きさ）を横軸にとってプロットした。

側結合型 (SCS) の場合、結合度が大いほど、高β型のものほど横方向のキックが強くなる。環結合型 (ACS) の場合は横方向へのキックはほとんどない。

高周波集群器

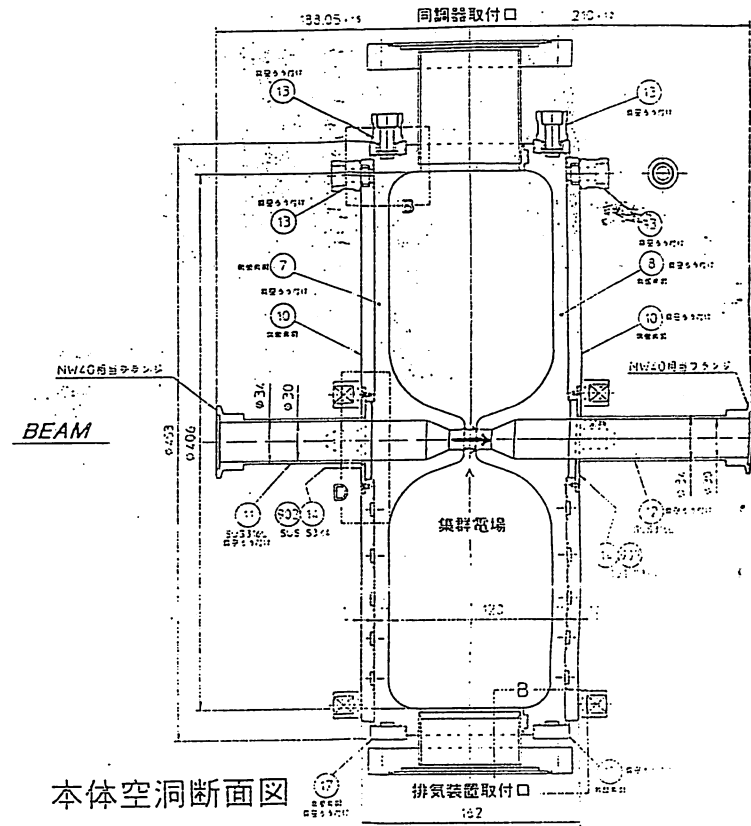
機能 高周波四重極加速器 (RFQ) から出た陽子ビームを次の漂流管加速器 (DTL) で効率良く加速する為の、高周波電場によるビームの位相集束 (集群)

構造 (本体部分) 半共軸型高周波空洞
 材質 無酸素鋼
 接合 炉中継付
 内径 406 mm
 軸長 (内寸) 120 mm
 口径 30 mm
 集群間隙 9 mm

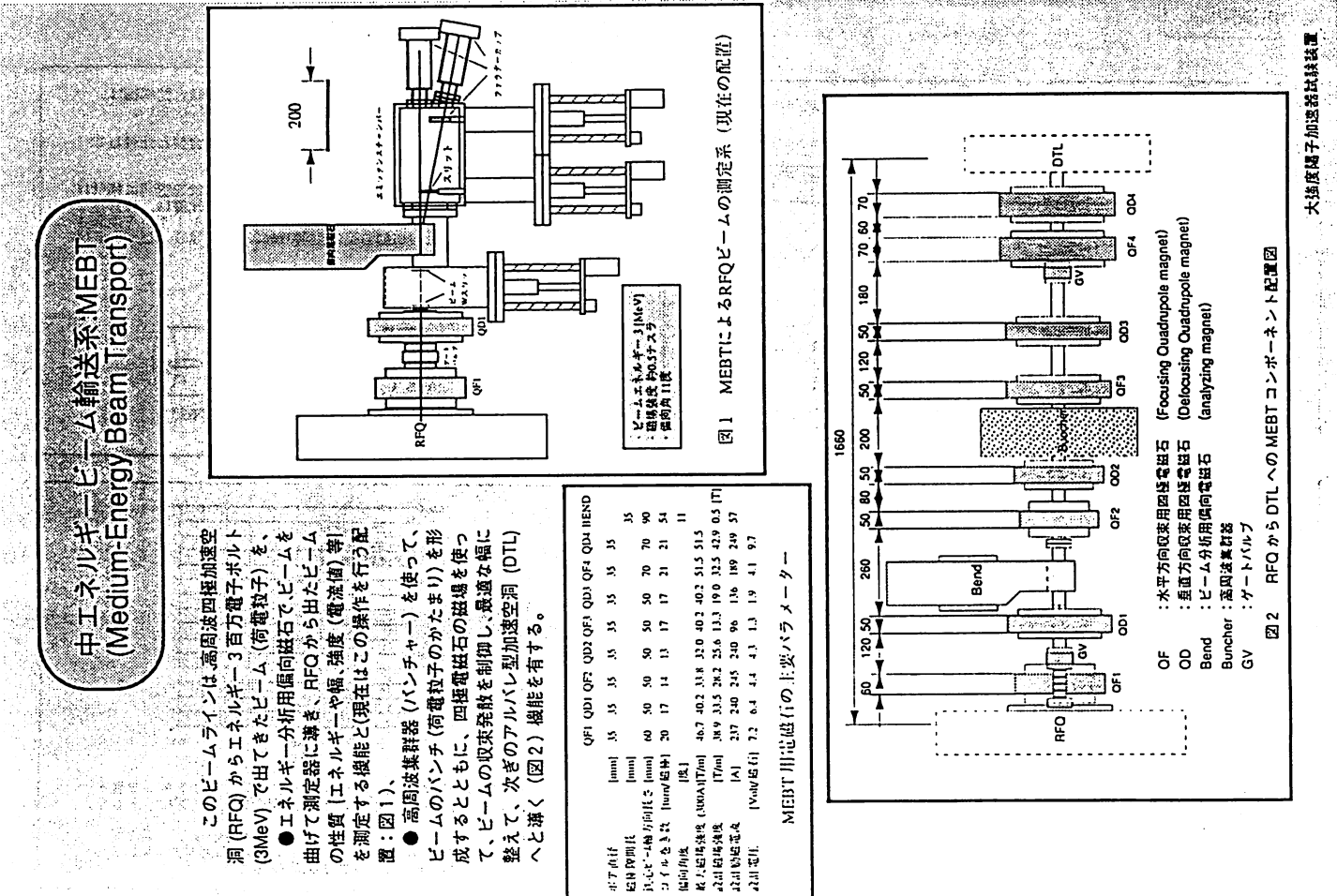
特性
 共振周波数 432 MHz
 同調幅 3 MHz
 無負荷Q 22000
 入力結合度 1
 間隙電圧 150 kV (7 kW入力時)

主要付属機器類の機能

- 入力結合器** 集群器本体である高周波空洞への電力の導入
- 同調器** 温度による空洞共振周波数のずれの補正
- 真空排気装置** 空洞内の高真空の保持



本体空洞断面図



⑧ 大電力高周波装置 1 2 9 6 M H z

カップルドキャビティリニアックにハイパワーの高周波電力を供給する装置です。

パルス幅 600 μ s、繰り返し 50 Hz で 5.5 MW の出力に成功しました。

この装置は大きく分けて、Lバンドクライストロン、クライストロンモジュレータ、パルストランスタンク、高周波低レベルの4つの部分からなっています。

○Lバンドクライストロン

クライストロンとは真空管の一種で、高周波電力を増幅する装置です。

ここで使用しているクライストロンは二極管タイプのものです。現在取り付けてあるのはフランスのトムソン社から購入したのですが、所内でも独自の開発を行っています。

○クライストロンモジュレータ

研究所内変電所から 6.6 kV、3相、50 Hz の交流電力を受けてそれを変調し、幅 600 μ s のパルス電力にして送りだします。

パルス波形はパルス成形回路 (PFN) と呼ばれる回路とスイッチング素子で発生させます。PFN は 50 段のコイルとコンデンサで構成されています。そしてスイッチング素子にはサイリスタを用いています。

○パルストランスタンク

パルストランスがこのタンク中で絶縁油に浸っています。このパルストランスではクライストロンモジュレータから送られるパルス電力を受け、電圧を 7 倍してクライストロンへ送ります。

○高周波低レベル ※今回は非公開

クライストロン出力を制御する小電力の高周波を発生させます。

Lバンドクライストロンの性能と大きさ

☆出力電力のピーク値	… 5.5 MW
☆増幅度	… 4.6 デシベル (電力値で約 4 万倍)
☆効率	… 4.8%
☆カソード電圧のピーク値	… 127 kV
☆ビーム電流のピーク値	… 90 A
☆高周波の周波数	… 1296 MHz
☆出力パルス幅	… 600 μ s
☆パルスの繰り返し	… 50 Hz
☆高さ&重さ	… 約 2 m、240 kg

クライストロンモジュレータの性能

☆出力電力のピーク値	… 1.5 MW
☆出力電圧のピーク値	… 20 kV
☆出力電流のピーク値	… 750 A
☆出力電力の平均値	… 450 kW
☆出力パルス幅	… 600 μ s
☆パルスの繰り返し	… 50 Hz
☆スイッチング素子	… サイリスタ、30 直列

※出力をパルストランスへ送り、
電圧を 7 倍してクライストロンへ送る

⑨ 大電力高周波装置 432MHz

高周波四重極リニアック、ドリフトチューブリニアックの2つの加速空洞にハイパワーの高周波電力を供給する装置です。

大きく分けて、UHFクライストロン、クライストロン電源、高周波低レベルの3つの部分からなっています。

○UHFクライストロン

真空管の一種で、高周波電力を増幅します。ここで使用しているクライストロンは、変調陽極型（M・アノード型）と呼ばれる三極管タイプのもので、パルス状の高周波電力を出力します。

○クライストロン電源

クライストロンが高周波電力を増幅するために必要なエネルギーを供給します。クライストロン電源を構成する装置には、フェンス内のクライストロンカソード高圧直流電源（高圧受電盤、変圧器、高圧直流電源、平滑コンデンサを含む）、クローバ回路、クライストロンタンクがあります。

研究所内変電所から6.6kV、3相、50Hzの交流電力をクライストロンカソード高圧直流電源に送り、そこで高電圧（110kV）の直流電力に変換し、並列に接続した2台のクライストロンのカソード電極に供給します。さらに個々のクライストロンタンク内で四極真空管をオン・オフすることにより、クライストロンのM・アノード電極にパルス電圧をかけます。

クローバ回路はクライストロンを保護するための装置です。この中にはイグナイトロンという電子管が入っています。このイグナイトロンは普通オフ状態ですが、クライストロンが短絡して平滑コンデンサに蓄えられていた大電力が流れはじめると、瞬時に（6μs以内）オン状態となって電力を通し（バイパスさせる、という）、クライストロンに大電力が流れ込んで損害を与えるのを防ぎます。

○高周波低レベル ※今回は非公開

クライストロン出力を制御する小電力の高周波を発生させます。高周波の出力安定化回路及び位相安定化回路、クライストロンおよび加速空洞を保護するためのインタロック回路も含まれています。

UHFクライストロンの性能と大きさ

☆出力電力のピーク値	… 2 MW
☆増幅度	… 46 デシベル (電力値で約4万倍)
☆効率	… 55%
☆カソード電圧（直流）	… 95 kV
☆M・アノード電圧（パルス） のピーク値	… 80 kV
☆ビーム電流（パルス） のピーク値	… 40 A
☆高周波の周波数	… 432 MHz
☆出力パルス幅	… 650 μs
☆パルスの繰り返し	… 50 Hz
☆高さ&重さ	… 約3m、1.2t

クライストロン電源の性能

☆出力電力のピーク値	… 5.5 × 2 MW
☆出力電圧（直流）	… 110 kV（負荷時）
☆M・アノード電圧（パルス） のピーク値	… 85 kV
☆出力電流（パルス） のピーク値	… 46 × 2 A (M・アノード電流の 1 × 2 Aを含む)
☆出力電力の平均値	… 179 × 2 kW
☆出力パルス幅	… 650 μs
☆パルスの繰り返し	… 50 Hz
☆スイッチング素子	… 四極真空管
☆クローバ回路	… イグナイトロン6直列、 負荷短絡時より 6 μs 以内で動作

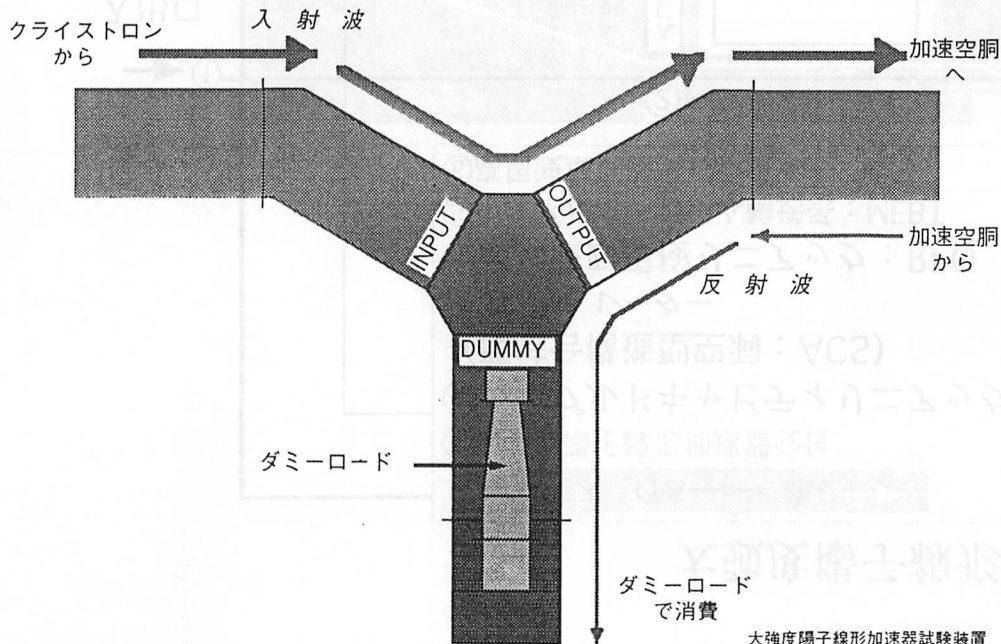
③ サーキュレータ

大きなY字型をした装置はサーキュレータと言い、高周波電力の通り道である導波管の特殊なものです。Y字のちょうど中心部にフェライトと呼ばれる特殊な材料と磁石とが組み込まれており、高周波電力を1つの方向にだけ伝えるという働きがあります。

・クライストロンという電子管から送られてきた高周波電力は、入力端（INPUT）から入ってきます。そして殆ど全て出力端（OUTPUT）へ出ていきます。ダミー端（DUMMY）へは殆ど出ません。

・加速空洞から反射がある場合、反射した高周波電力は出力端（OUTPUT）から入ってきますが、それらは殆ど全てダミー端（DUMMY）へ出てきて、ダミーロードで消費されます。入力端（INPUT）へは殆ど出ません。

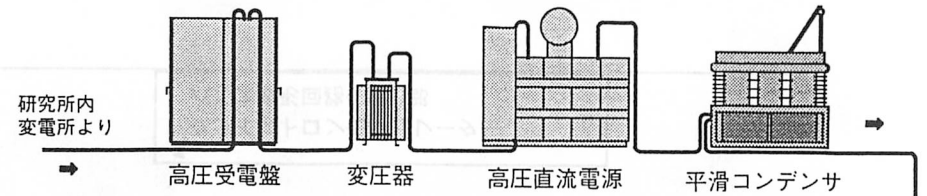
このサーキュレータを用いることで、加速空洞から反射がある場合でも、クライストロンが保護され、また安定に高周波電力を加速空洞に伝えることができるのです。



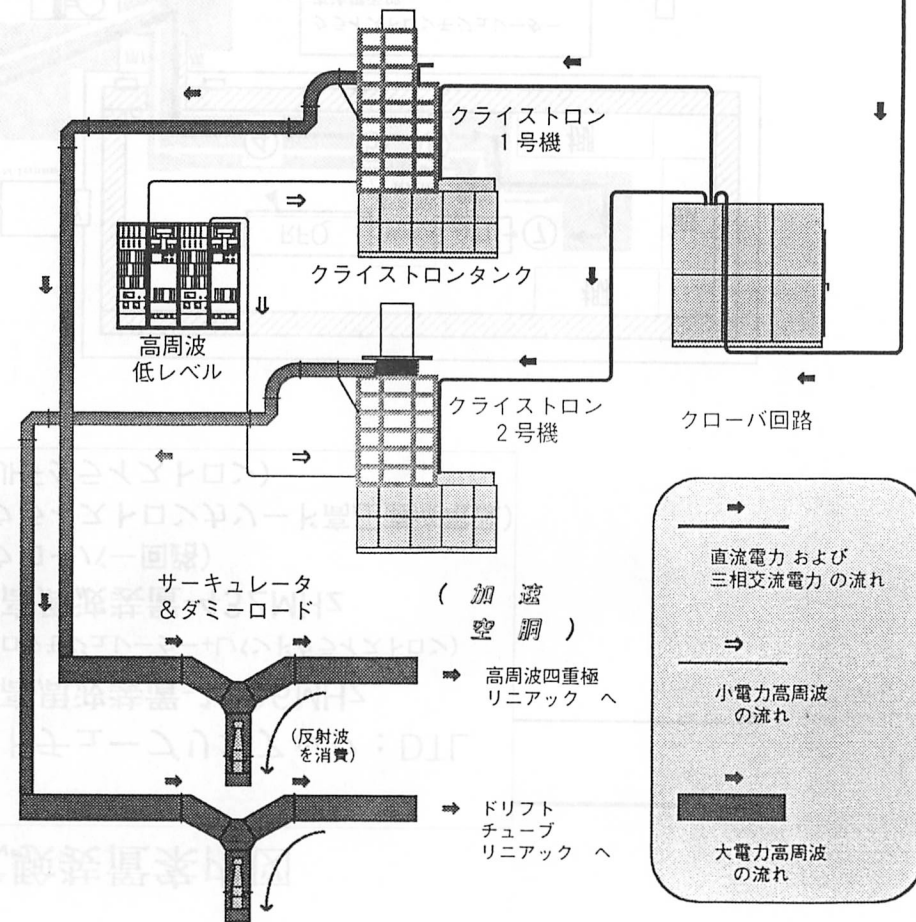
大強度陽子線形加速器試験装置

大電力高周波装置—432MHz の概略図

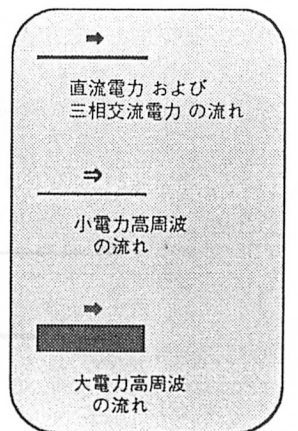
（電力供給）



（高周波発生）



（加速空洞）



大強度陽子線形加速器試験装置

大強度陽子線形加速器試験装置案内図

見学コース 行き → 帰り ←

- ①大強度陽子線形加速器受付
- ②カップルドキャビティリニアック (環結合構造型空洞 : ACS)
- ③サーキュレーター
- ④高周波四重極リニアック : RFQ
- ⑤中エネルギービーム輸送系 : MEBT
- ⑥高周波集群器 : バンチャー
- ⑦ドリフトチューブリニアック : DTL
- ⑧大電力高周波装置-1296MHz (クライストロンモジュレーター+レバンドクライストロン)
- ⑨大電力高周波装置-432MHz (⑨-1 クローバー回路) (⑨-2 クライストロンカソード高圧直流電源) (⑨-3 UHFクライストロン)

