

高エネルギー加速器セミナー OHO'05

超伝導陽子リニアック

大内伸夫(原研)

1 超伝導陽子リニアックの基礎

1. 超伝導陽子リニアックとは

1.1. 超伝導加速器

一般的に「超伝導」と言えば超伝導マグネットが連想され、核融合炉用超伝導マグネットやリニアモーターカー等で一部実用化されている。実際に、円形加速器において超伝導マグネットを使用した加速器を「超伝導加速器」と呼ぶ場合もあるが、ここで言う超伝導とはビームを加速するための高周波加速空洞を超伝導化したものである。

近年の超伝導加速空洞技術の急激な進展(高加速電界の実現、安定した性能を達成するための製作技術、等)を背景として、世界各国で超伝導加速空洞を利用した電子、陽子、重イオン加速器が稼動、建設されている。我が国では、電子加速器では KEK-B Factory(KEK)、及び FEL(原研)、重イオン加速器では TANDEM Booster(原研)が稼動中である。また、各国で研究開発が進められているリニアコライダーについては、これまで常伝導と超伝導の双方で R&D が進められてきたが、超伝導空洞で一本化することが正式に決定された。

超伝導加速空洞を用いた陽子加速器に関しては現時点では稼動しているものは無いが、核破砕中性子源や加速器駆動核変換システム(ADS)をターゲットとした大強度陽子リニアックを中心に研究開発及び建設が進められてきており、米国の核破砕中性子源計画(SNS)では超伝導陽子リニアックの建設が進められている。我が国の大強度陽子加速器計画(J-PARC)では、2 期工事に超伝導陽子リニアックの建設が予定されている。また、ADS 用超伝導リニアックの研究開発も世界各国で進められている。

1.2. 超伝導陽子リニアックの構成

陽子リニアック用の超伝導加速空洞は高純度のニオブで製作される。運転時には液体ヘリウムにより 2K 程度まで冷却されるため、超伝導加速空洞はクライオスタット(極低温保冷容器)内に収

納される。超伝導加速空洞には、RF 入力カプラ、高調波出力カプラ、チューナー等の付属機器が装着される。これらの超伝導空洞、クライオスタット及び付属機器を一体化したものをクライオモジュールと呼ぶ。Fig.1 に J-PARC 2 期計画用クライオモジュールの概略図を示す。クライオモジュールとビーム収束用電磁石を直線状に配置することにより超伝導陽子リニアックが構成される。

ビーム力学及び高周波技術は常伝導・超伝導加速器の何れの場合においても設計製作する上で必要不可欠な技術である。それに加えて、常伝導加速器の場合には空洞の水冷構造が重要な要素となり、超伝導加速器の場合には極低温技術が必要不可欠の技術となる。また、超伝導加速器の場合には液体ヘリウムを使用するため、我が国においては高圧ガス保安法の規制を受けることになる。

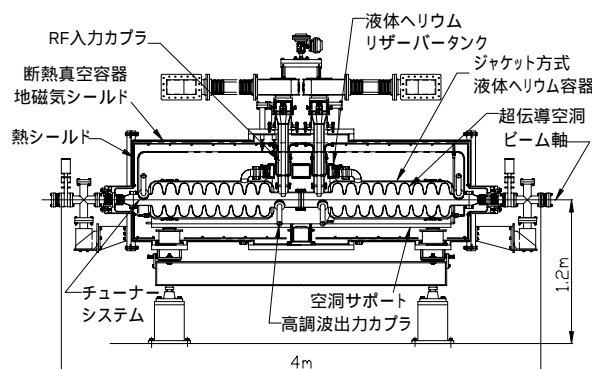


Fig. 1 J-PARC 2 期計画用クライオモジュール

2. 超伝導陽子リニアックの特徴

超伝導陽子リニアックの特徴は、加速空洞を超伝導化することにより空洞壁面での高周波損失を低減できることにある。常伝導空洞の Q 値は通常 10^4 程度であるのに対して、超伝導空洞の Q 値は $10^8 \sim 10^{10}$ となる。これは、超伝導空洞の高周波損失が常伝導空洞の $1/10,000 \sim 1/1,000,000$ であることを示しており、ほとんど全ての高周波電力をビームに与えることが可能となる。

本章では、常伝導リニアックと比較した超伝導陽子リニアックの特徴について、運転コスト、ビーム損失、加速電界強度、空洞内面処理の観点から述べる。

2.1. 運転コスト

超伝導陽子リニアックの最大の特徴は、その経済性にある。

Fig.2 にエネルギー100MeV~1.5GeV の領域でCW(連続ビーム)運転を想定した場合の加速空洞の励振するのに必要な電力を加速器長との関係の例を示す。加速器の詳細設計(空洞のシャントインピーダンス、フィリングファクタ：全長に対する有効加速長、高周波源効率、ヘリウム冷凍機効率等)により消費電力と加速器長の関係は異なるので、本結果はその一例として大まかな傾向を見てもらいたい。

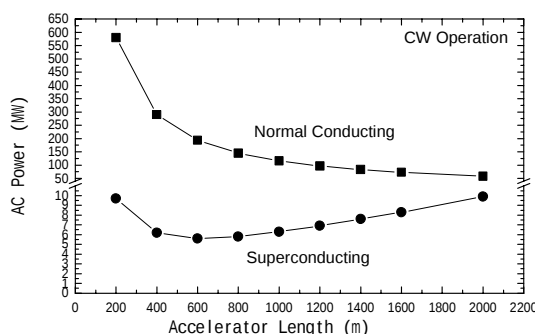


Fig. 2 CW 運転時の空洞を励振するために必要な電力と加速器長との関係(エネルギー100 ~ 1500MeV)

常伝導リニアックでは、空洞を励振するのに必要な電力はもっぱら高周波電力となる。加速電界を2倍に上げると、単位長さあたりの消費電力は4倍となり、全長は半分となるため、必要総電力は2倍となる。したがって、加速器長と消費電力は反比例の関係となる。(Fig.1の結果は、平均シャントインピーダンス57M Ω /m、フィリングファクタ65%、高周波源効率60%を想定した。)

一方、超伝導リニアックの場合には、ビームに持って行かれる電力と比較して空洞壁で消費される電力は無視できるほど小さい。したがって、

消費電力は専らヘリウム冷凍機の運転電力となる。ヘリウム冷凍機が除熱すべき負荷は、空洞壁での高周波発熱分と熱侵入による入熱分の双方である。図に示されるように、加速器長が短い領域では高周波発熱分が大きいため常伝導空洞と同様に反比例に近い関係となるが、加速器長が長くなるにしたがって熱侵入による寄与が大きくなり消費電力は長さに比例する。したがって、超伝導リニアックの場合には高周波発熱と熱侵入量とのバランスにより、運転電力が最少となるポイントがある。(Fig.1の結果は、運転温度2K及び冷凍効率1/1000を想定し、熱侵入量は4W/mを想定した。)

Fig.1に示されるように、常伝導の場合には全長2kmもの長大なリニアックとした場合でも50MWもの電力が必要となる。また、常伝導の場合には、消費電力の問題だけでなく空洞本体の冷却構造も問題となり、CW運転時の実用的な加速電界強度を1MV/m程度とすれば全長は2.4kmまで必要となる。これに対して、超伝導の場合には全長600m程度で電力が最少となり消費電力は6MW程度となる。

以上のことから、CW運転を想定した場合には、必然的に超伝導リニアックを選択せざるを得ない。

これに対して、パルス運転時には状況はだいぶ異なってくる。Fig.3に常伝導でデューティ(ビームを加速する時間的な割合)20%、10%、1%の場合及び超伝導でデューティ10%の場合の消費電力を示す。評価の条件は前述のCW運転時と同様であるが、超伝導ではパルスごとに空洞を励振するための高周波電力も考慮に入れてある。

常伝導の場合には、CW運転時の消費電力にデューティを掛けたものとなり反比例の関係が維持される。一方、超伝導の場合には空洞壁での高周波損失分がかなり小さくなり、ほとんどが熱侵入負荷分となり直線的となってくる。前述のパルスごとに空洞を励振するための高周波電力も相対的にあまり大きくない。したがって、デューティを20%以下の領域で変化させても消費電力はあまり変わらない。

以上のことから、デューティが数%程度の領域であれば、リニアックの設計条件によっては常伝導の選択肢も十分にありえることになる。CW 運転時に問題となる常伝導空洞の冷却構造に関しても、デューティ数%程度であれば 3MV/m 程度の加速電界強度も十分可能となってくる。さらに、超伝導でパルス運転を行う場合には後述するように超伝導空洞自身の電磁力がパルス上に印加されるため振動が誘起されることが懸念され、これが加速電界強度及び位相の揺らぎをもたらす可能性があり、設計においては十分な検討が必要となる。

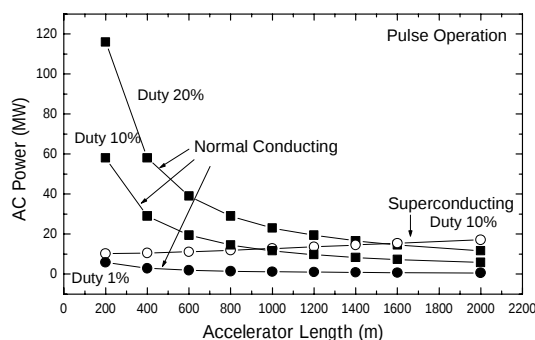


Fig. 3 パルス運転時の空洞を励振するために必要な電力と加速器長との関係(エネルギー 100 ~ 1500MeV)

2.2. ビーム損失

大強度陽子加速器では、ハンスオンメンテナンスを可能にするとともに遮蔽を容易にするために機器の放射化を極力抑制しなければならない。例として、J-PARC リニアック(デューティ 2.5%、平均電流 333 μ A)の高エネルギー部ではビーム損失 0.1W/m で設計が行われている。ビーム電流が増加した場合でも同程度のビーム損失に抑制する必要がある。

ビーム損失を低減させるためには、空洞のボア径ができるだけ大きいほうが望ましい。常伝導空洞の場合には、空洞のシャントインピーダンスを高く取る必要があることから、一般的なボア径は 10mm 前後となる。これに対して、後述する超伝導楕円空洞の場合には数 cm まで大きくすること

が可能となり、RMS ビームサイズの 10 倍程度のボア径を確保できる。

一方、前述したように超伝導空洞のパルス運転の場合には、パルス励振による振動が加速電界強度及び位相の揺らぎをもたらす、ビーム損失の原因となる可能性がある。

2.3. 加速電界強度及びフィリングファクタ

大強度陽子加速器における常伝導空洞の加速電界強度は、前述したように熱負荷と冷却能力によって支配される。デューティ数%程度のパルスマシンにおいて 3MV/m 程度が現実的な値である。

これに対して、超伝導空洞の場合には高エネルギー部(数 100MeV 以上)においては 10 ~ 20MV/m 程度まで実現可能である。実際に、電子リニアック用の空洞では 25MV/m 程度で運転されているものもある[1]。

常伝導リニアックのフィリングファクタは、空洞間にビーム集束用四重極電磁石を入れるためのスペースが必要であり、J-PARC の 200 ~ 400MeV で使用される ACS(環状結合型空洞)でのフィリングファクタは 65%程度である。

これに対して、超伝導リニアックの場合にはビーム集束用四重極電磁石のスペースとともに、クライオモジュール両端に断熱スペースが必要となる。Fig.1 で示した J-PARC2 期計画用超伝導リニアックではフィリングファクタは 32%である。

2.4. 空洞内面の処理

加速空洞は常伝導でも超伝導でも大電力高周波機器であるため、放電、電界放出、マルチパクタリング等を抑制するために、高周波電流の流れる空洞内面の平滑化と清浄度管理は必要不可欠である。

常伝導空洞の内面平滑化は、主に Q 値の向上を目的として実施される。これは高周波電流の流れるパスを最短とすることにより、空洞壁面での高周波損失を抑制することである。メッキや電界研磨等により内面の平滑化が行われる。

常伝導空洞の精度管理は、空洞自体が重量物であることから簡易的なクリーンルームあるいはクリーンブース内で組立が行われる。

これに対して超伝導空洞の内面平滑化は、主に平滑化による電界集中を抑制するとともに、不純物の除去を目的として実施される。これにより空洞の超伝導破壊を抑制し、高加速電界を実現することが可能となる。バルクニオブ材により製作された超伝導空洞の内面平滑化の手法としては、化学研磨あるいは電界研磨により空洞内面を $100\mu\text{m}$ 程度除去する。

超伝導空洞の清浄度管理は、常伝導空洞と比較して厳密に行われる必要がある。これは、空洞内面がゴミ等で汚染されていると電界放出により電子が放出され、これが空洞内の電界により加速され壁面に衝突する。これにより空洞の高周波損失を見かけ上増加させるだけでなく、壁面の温度を上昇させ超伝導破壊を招く。一般的な超伝導空洞の清浄度管理は、超純水(あるいは純水)による高圧水洗浄及びクラス 10～100 程度のクリーンルーム内での組立により行われる。

3. 超伝導加速空洞

超伝導加速空洞は、ビームの β (粒子の速度と光速との比)に応じて種々の形状が考案され、また実用化されている。本章では、代表的な超伝導加速空洞の特徴とその動作原理及び楕円空洞を中心に製作方法について述べる。

3.1. 本文

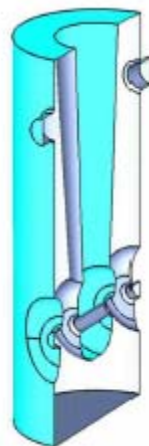
Fig.4 に代表的な超伝導空洞を示す[2]。

$\lambda/4$ 共振器(Quarter-wave resonator)は、 β の小さな(0.1 程度)重イオン加速器に利用され、周波数は 100MHz 前後のものが一般的である。

$\lambda/2$ 共振器(Half-wave resonator)は、 $\lambda/4$ 共振器よりも β が大きめ(0.2 程度)の重イオン加速器に利用され、周波数も $\lambda/4$ 共振器よりも高め(200MHz 程度)で使用される。

スポーク空洞(Spoke cavity)は、 $\lambda/2$ を変形させたもので、Fig.4 に示したものは多セル化したものである。スポーク空洞はまだ実用化されてい

るものではないが、超伝導陽子リニアックの中エネルギー領域(数 10MeV～200MeV 程度: β が 0.2 から 0.6 程度までの領域)用の超伝導空洞として注目されており、各国の研究機関で開発が進められている。



Quarter-wave resonator



Half-wave resonator



Spoke cavity



Elliptical cavity

Fig. 4 種々の超伝導加速空洞[2]

楕円空洞(Elliptical cavity)は、電子加速器用($\beta=1$)として開発されたもので、リニアックあるいはシンクロトロンで多数使用実績のあるものである。超伝導陽子リニアックの開発は、楕円空洞を $\beta>0.5$ 程度までに拡張して開発を進めることで開始された。現在米国で建設中の SNS や J-PARC 第2期計画の超伝導陽子リニアックも楕円空洞である。

3.2. 超伝導空洞の加速原理

超伝導空洞は何れも定在波型の空洞共振器である。等価回路的に見れば LCR の共振器であり、磁界が発生する部分がリアクタンス成分(L)、電界が発生する部分がキャパシタンス成分(C)、内壁面の抵抗成分が抵抗(R)と見なせる。高周波的に見れば、空洞内に供給された高周波が反射を繰り返し、空洞内部の高周波成分と供給される高周波の位相が合致した際に重なり合って強い電磁界成分を作り出す。空洞内で発生した高周波電界成分によりビームが加速される。

$\lambda/4$ 及び $\lambda/2$ 空洞は同軸型の空洞共振器が原型となっている。Fig.5 に同軸型共振器の原理を模式的に示す。同軸管の外導体の両端を塞ぎ、一方の内導体を外導体と短絡させて、もう一方を開放させると $\lambda/4$ 型共振器となる。その場合の最低次の共振モードでは、開放側の先端に電界が発生し、短絡側に磁界が発生する。電界が発生する場所にビームを通せば加速されることになる。

これに対して、内導体の両端を短絡させた場合

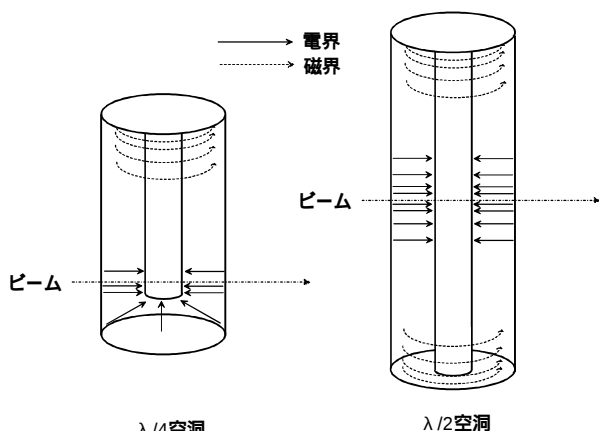


Fig. 5 同軸型共振器の加速原理

には $\lambda/2$ 共振器となり、その最低次共振モードでは中央に電界が発生し、両端に磁界が発生する。したがって、中央部にビームを通してやればビームが加速できる。

スポーク空洞は、縦型円筒形状の $\lambda/2$ 空洞を横長円筒形状にしたものである。Fig.6 にスポーク空洞の加速原理を示す。Fig.4 に示されるスポーク空洞は多セル化されたものであり、その電磁界も同様に模式的に示す。

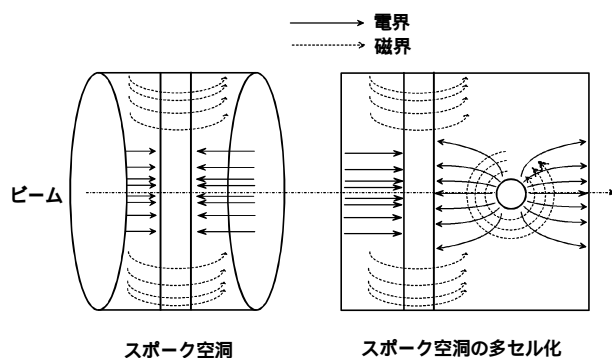


Fig. 6 スポーク空洞の加速原理

楕円空洞は、リエントラント型空洞が原型となっている。Fig.7 にリエントラント型空洞及び楕円空洞の加速原理を模式的に示す。リエントラント空洞の最低次共振モードでは中央部で電界が発生し、外周部で磁界が発生する。その中心部でビームを通せば加速されることになる。楕円空洞はこれを連結して多セル化したものである。(KEK-B Factory では、単セルの楕円空洞が使用されている。)

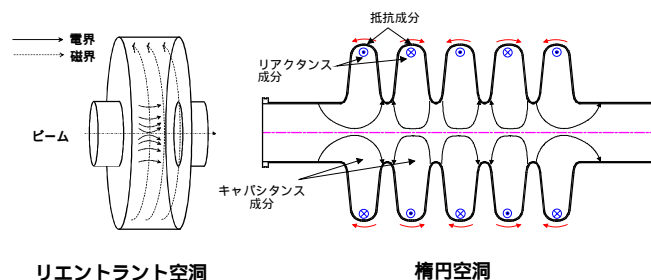


Fig. 7 リエントラント型空洞と楕円空洞の加速原理

多セル化した場合には、セル数を n とした場合に(Fig.7 では $n=5$)セル毎に高周波電磁界の位相がどれだけずれるかによって $\pi/n, 2\pi/n, \dots \pi$ モー

ドまでの n 個の共振モードが発生する。これらのモードのうち、超伝導加速空洞として利用するのは、 π モードである。(Fig.7 で隣り合うセルの電磁界の位相が逆転している。)

Fig.8 に、楕円空洞によるビームが加速される様子を模式的に示す。図中の(1)では、最初のセルで加速電界に乗って加速粒子の集まり(バンチ)が加速される様子が示されている。(2)は高周波位相が $\pi/2$ だけ進んだ状態を示しており、電界が消え磁界及び高周波電流が流れている。(3)では位相がさらに $\pi/2$ だけ進んだ状態であり、バンチは次のセルまで進み再度加速電界により加速される。(4)ではさらに $\pi/2$ だけ位相が進んだ状態であり、これを繰り返すことによりビームが加速される。

以上のことから、高周波の周期とビームの速度は同期している必要があり、セル長 l は

$$l = \beta \lambda / 2$$

β : ビームの速度と真空中の光速との比

λ : 真空中の高周波の波長

である必要がある。陽子の場合には、1GeV であっても $\beta < 0.9$ でありエネルギーによって β が異なるが、全ての超伝導空洞形状を完全に粒子の β に合わせることは製作する上で困難であるとともに、超伝導陽子リニアックでは高い加速電界を実現できるように縦(ビーム軸)方向のアクセプタンスが高くなることにより、ある程度の位相スリップは容認できる。したがって、超伝導陽子リニアックでは、超伝導加速空洞を幾つかのセクションに分割し、セル長を調整している。

また、図に示されるように赤道部では磁場が強く発生するために電流が流れ、発熱や超伝導破壊(クエンチ)が発生しやすい箇所である。それに対して、アイリス部では電界が集中するため放電や電界放出等が発生しやすい箇所である。

3.3. 楕円空洞の製作方法

本章では、超伝導陽子リニアックの主要部に用いられる楕円空洞を中心に製作方法について述べる。CERN では、銅製の空洞内面にスパッタリングによりニオブ薄膜を形成することにより超伝導空洞を製作する技術を開発したが、ここでは

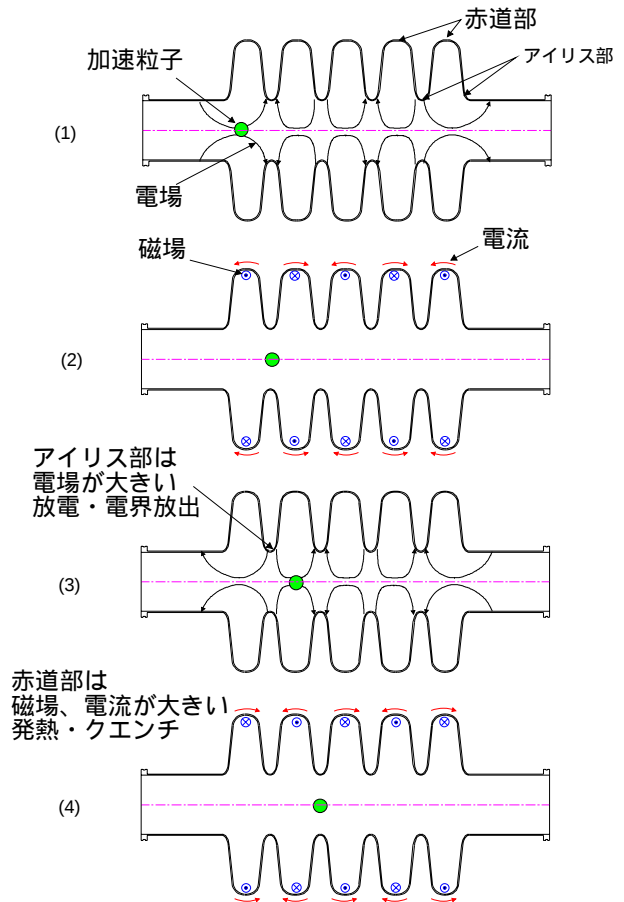


Fig.8 楕円空洞内での加速粒子の様子

最も一般的に用いられているバルクニオブを用いた空洞の製作方法を紹介する。

3.3.1. ニオブ材料

一部の重イオン用超伝導加速器で鉛が用いられた例があるが、現在最も一般的に用いられている材料は純ニオブ(臨界温度 $T_c=9.3K$)である。

超伝導材料の純度は、RRR(残留抵抗比: 室温での直流電気抵抗と超伝導状態になる直前の抵抗との比)で表されることが多い。原子炉級のニオブ材は RRR ~ 50 程度であるが、超伝導加速空洞に用いられるニオブ材料は 100 以上、典型的には 200 前後である。ニオブ材の高純度化は、真空溶解を複数回実施して水素、酸素等のガス成分を除去することによりなされる。

ニオブ材料の強度は、他の金属と同様に純度が上がれば耐力は低下する。RRR ~ 200 程度のニオブ材料を 750 程度で焼きなました材料の室温における耐力は 50MPa 前後であるが、液体ヘリウム温度(4.2K)では 400MPa 以上まで向上する[3]。また、ニオブ材料は加工硬化の大きな材料として

も知られており、室温における耐力は加工履歴によって大きく変化する。

3.3.2. 製作方法

Fig.9 に典型的な超伝導楕円空洞の製作手順を示す。

まず、ニオブ材料は成形加工により半セル形状に加工される。成形方法はプレス成形もしくはへら絞り加工によりなされる。プレス成形では、雄型と雌型により多数の成形が可能となるが、スプリングバック等による誤差が生じるため計算や試作により型の形状を決定をする必要がある。一方、へら絞り加工では、雄型に押し付けて成形するためかなり精度の良い内面形状となるが、時間がかかることと肉厚のばらつきが生じやすい。

成形の終了した半セル材料は機械的なトリム加工により両端の不要な部分を切断し、最終的な半セル形状となる。

各半セル材料同士及び両端のビームパイプの溶接は、電子ビーム溶接によりなされる。これは、ニオブ材料が高温で窒化物を生成しやすいためである。また、滑らかな内面を形成するために溶接条件出しには細心の注意が必要である。一般的には、内面の溶接ビードはグラインダ等により滑らかに加工される。以上の工程により、超伝導空洞の形状が完成し、次節に示す表面処理の工程に進むことになる。

3.3.3. 表面処理

表面処理は、超伝導空洞の性能を左右する非常に重要な工程である。パルクニオブ製超伝導空洞の表面処理は、化学研磨と電界研磨に大別される。

化学研磨は、フッ酸、硝酸、リン酸の混合液によりニオブ表面を溶かし出すものである。温度管理により反応速度を管理し、滑らかな光沢のある表面を作り出す。特に形状的な制約が無い場合、楕円空洞のような単純な形状でも、スポーク空洞のような複雑な形状でも対応可能である。また、電子ビーム溶接部の開先の処理や、電解研磨では困難なポート部分の処理にも用いられる。研磨厚みは時間によって管理する必要があるが、化学研磨の終了したものは速やかに洗浄されなければならない。また、化学研磨では結晶粒界で反応が進

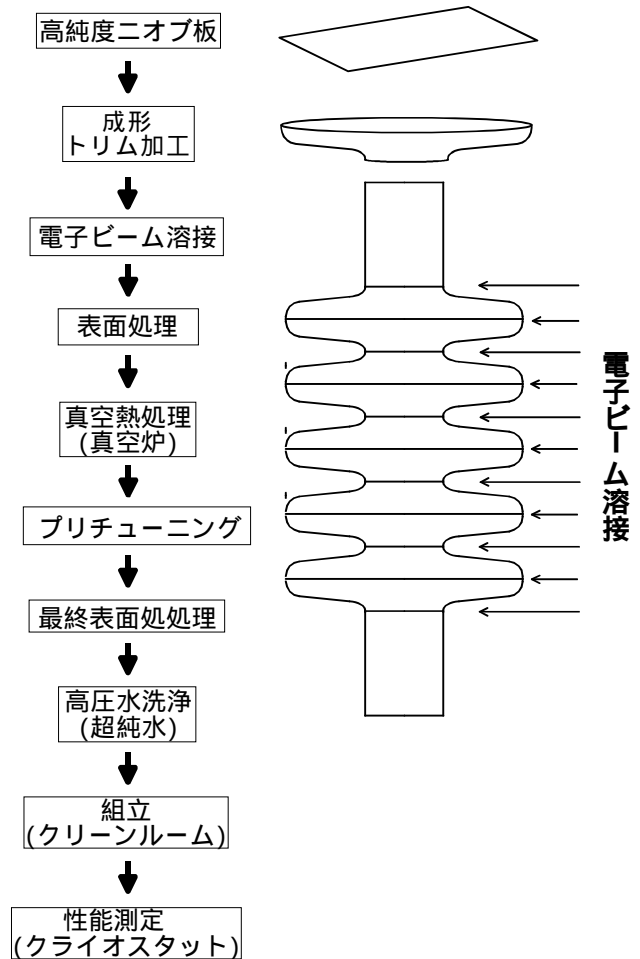


Fig.9 楕円空洞の典型的な製作手順

みやすいという特徴があるため、電界研磨ほど平滑な面を作ることは困難である。

電界研磨は KEK により開発が進められた表面処理手法であり[4]、楕円空洞内にアルミ製の電極を挿入し、空洞内にフッ酸、硫酸の混合液を入れ、空洞を陽極、アルミ製電極を陰極として電流を流し、電気化学的な手法によりニオブ表面を溶かし出すものである。Fig.10 に楕円空洞の電界研磨の模式図を示す。電解研磨では、空洞を回転させることにより周方向に均一な研磨厚みを確保する。電解研磨では、陰極との距離が短い場所(ビームパイプやアイリス部)は研磨が進みやすく、遠い場所

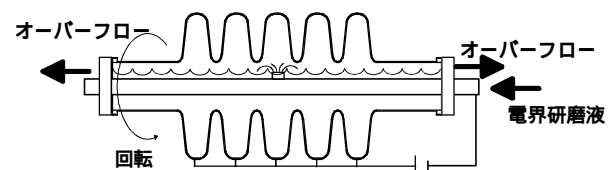


Fig.10 楕円空洞の電界研磨の模式図

(赤道部)では進みにくいという欠点を持つ。したがって、スポーク空洞のような複雑な形状の空洞の表面処理は困難である。さらに、空洞内に電極を挿入する必要があることから、アイリス部及びビームパイプ部の半径をある程度確保する必要がある。このことにより、 β が小さくなるにしたがって(セル形状が扁平になる)アイリス部の最大表面電界(E_{sp})と加速電界(E_{acc})との比が大きくなり、実効的な加速電界が低下してしまう。一方、ミクロ的な視点で見れば、局所的な突起に電界が集中するため優先的に反応が進み、より滑らかな表面を形成することができる。光沢のある内表面を形成するためには、適切な温度管理と電流の管理により反応速度を管理することも必要である。電界研磨においては、反応により発生する水素ガスがニオブ内に吸蔵されるため、後述する真空熱処理が必要となる。最近の研究により、化学研磨と比較して電界研磨により表面処理を行った空洞が高い加速電界を実現できることが明らかとなった[5]。

3.3.4. 真空熱処理

電界研磨を施した空洞においては、水素がニオブ材料内に吸蔵されてしまう。このような空洞においては、100K 程度の温度に長時間さらされた場合に Q 値の低下(表面抵抗の増大)を招き、それに伴って加速電界の上限も大きく制限される。

これを抑制するために、真空加熱炉による熱処理が行われる。通常、温度 750 ° 程度、3 時間程度の熱処理が行われる。Fig.11 に、電界研磨を施した超伝導空洞の真空熱処理の一例として、温

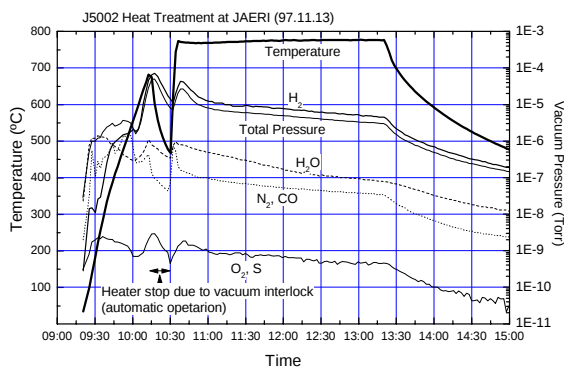


Fig.11 電界研磨を施した空洞の真空熱処理

度、全圧、分圧を時間の関数として示す。図に示されるように、温度が 550 ° を超えたあたり(時間で 10:00 頃)で急激に水素の分圧が上昇していることがわかる。(図では、10:15 頃に真空度のインターロックが働いて、10:30 まで加熱炉のヒーターが停止している。)

最近、電界研磨においても熱処理が不要な手法が新たに開発された[6]。

3.3.5. プリチューニング

既に述べたように、楕円空洞は板金加工により製作されているため製作誤差が大きいのに加えて、表面処理による肉厚変化、熱処理による変形等が発生する。これは、空洞の共振周波数のずれをもたらすだけでなく、各セル間の電場分布を歪めることにつながる。プリチューニングは各セルを伸縮させ、共振周波数のずれ及び加速電界の非均一性を矯正するものである。プリチューニングは、Fig.9 に示されるように熱処理の後、最終表面処理前に実施される。Fig.12 にプリチューニング前後における空洞内の軸上電場分布の例を示す。プリチューニング前では 16%のずれが合ったのに対して、プリチューニング後では 1%以内に収まっており、計算結果(SUPERFISH)との一致も良好である。

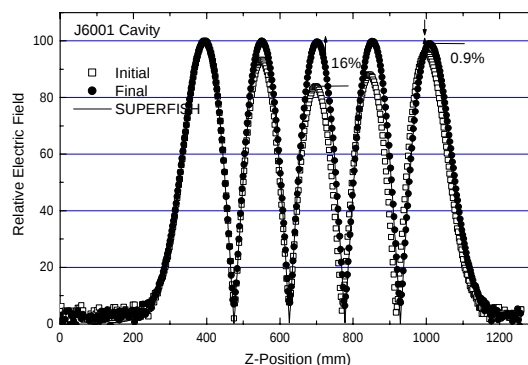


Fig.12 プリチューニング前後における空洞の軸上電場分布

3.3.6. 洗浄、組立

ブリチューニングの終了した空洞は、最終表面処理(数 $10\mu\text{m}$ 程度)を実施した後に洗浄、組立工程となる。

洗浄は、超純水を高圧(8～9MPa)で空洞内面にあてることにより空洞内面のゴミ、埃等を除去する。その後、組立作業に移るが、これらの一連の作業は、防塵管理されたクリーンルーム内(クラス 10～100)で実施されなければならない。

特に、クライオスタット内に空洞を挿入し、高周波入力結合器等の付属機器を取り付ける作業については、粉塵の混入の確率が最も高くなるため十分な防塵管理が必要となる。

3.4. 超伝導空洞の性能

Fig.13 に、超伝導楕円空洞の性能の一例として、 $\beta=0.6$ 、600MHz、5 セル空洞(2 個)の単体性能試験結果を示す。本測定は、温度 2.1K において実施された。図に示されるように、最大表面電界(E_{sp})は 31 及び 40MV/m を達成しており、Q 値についても 10^{10} 程度と良好な値を示している。

電子加速器用の楕円空洞については、最大表面電界で 80MV/m 近くまで実現しているので、本質的にはさらに高加速電界を実現できる可能性を有していると考えられる。

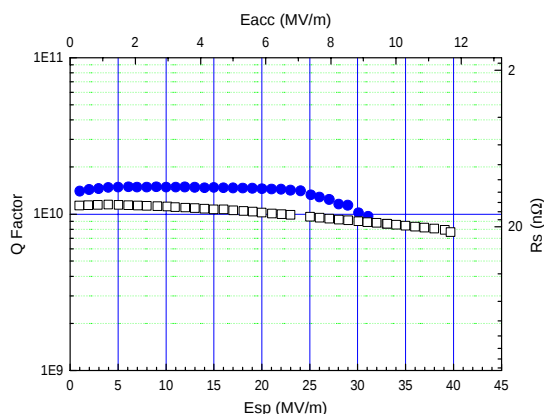


Fig.13 $\beta=0.6$ 、600MHz、5 セル超伝導空洞の単体性能試験結果

超伝導空洞の表面抵抗は、BCS 抵抗と残留抵抗に大別され、BCS 抵抗は周波数の 2 乗に比例して

増加し、温度の低下とともに減少する。超流動液体ヘリウム(2.17K 以下。飽和状態では圧力 5kPa 以下)では BCS 抵抗はほとんど無視でき、発熱が小さくなるために高加速電界も実現可能となる。一方、ヘリウム冷凍機の熱力学的な効率は、4.2K で 1/300 程度、2K では 1/1000 程度となる。したがって、一般的に 500MHz 以下の超伝導空洞については 4.2K(1 気圧での飽和液体ヘリウムの温度)程度で運転され、周波数 500MHz 以上では運転温度は 2K 程度となる。超伝導陽子リニアックの場合、高エネルギー部では楕円空洞を使用し、周波数 700～1GHz 程度と比較的高いため運転温度は 2K 程度となる。これに対して、 $\lambda/4$ 共振器、 $\lambda/2$ 共振器、スポーク空洞は比較的周波数が低いため、運転温度は 4K 程度となる。

4. 付属機器

クライオモジュールには、超伝導空洞に付属するものとして以下の機器が装着される。

4.1. 高周波入力カブラ

超伝導空洞に高周波を入力するためのアンテナであり、ビームパイプ部に取り付けられる。高周波入力カブラには超伝導空洞内の真空中と大気とを遮断するセラミック窓を備えており、大強度陽子リニアックでは数 100kW から 1MW 程度までの大電力が通過するため、セラミック窓の信頼性が重要となる。また、高周波入力カブラは、熱侵入の主要なパスの一つとなるため、十分な断熱設計がなされる必要がある。超伝導陽子リニアック用の高周波入力カブラは、同軸アンテナタイプが一般的に用いられている。

4.2. 高調波出力カブラ

超伝導空洞では、その Q 値が高いためにビームによって高調波が誘起される。この高調波がビームに悪影響を与えると同時に、最悪の場合には空洞の超伝導破壊をもたらすため、高調波の電力を外に取り出すための高調波出力カブラが空洞の両端に取り付けられる。これは、加速モードの共振周波数については高い Q 値を維持しつつ、高

調波モードについては見かけ上の Q 値を常伝導空洞並に低下させることと同義である。したがって、高調波出力カプラは加速モード周波数では反射させ、高調波モード周波数では透過するようなフィルタ構造を有している必要がある。さもなければ、高周波入力カプラから入力された高周波電力が高調波出力カプラから外部に漏れてしまう。一般的に高調波出力カプラは空洞と同様にニオブで製作されるが、発熱が大きくない場合には銅で製作できる可能性がある。

4.3. チューナー

超伝導空洞の共振周波数を調整する機構であり、空洞を弾性範囲内で引っ張ることにより全長を変化させ、周波数を調整する。空洞を引っ張るための機械的な構造は、粗調整はステッピングモーターによりなされ、微調整は圧電素子(ピエゾ素子)によりなされる。チューナーは超伝導空洞の両端を拘束することになるため、パルス運転時の空洞の振動を抑制するために十分な強度を有している必要がある。また、チューナーも熱侵入の主要なパスとなるため、十分な断熱設計が必要である。

4.4. 磁気シールド

超伝導空洞は、磁場が存在する場所で超伝導状態に遷移するとその磁場をトラップし、残留抵抗の増大を招く。したがって、主に地磁気を遮蔽するための磁気シールドが必要であり、空洞の位置で 20mGauss 程度まで残留磁場を低減させる必要がある。通常はクライオスタット内にパーマロイやミューメタル製の磁気シールドを配置するが、4 K 運転の超伝導空洞ではクライオスタット自身を鉄製として磁気シールドを兼ねているものもある(KEK-B Factory)。

4.5. 断熱構造

クライオモジュールの断熱構造はヘリウム冷凍機の断熱負荷を低減させるために重要な要素となる。熱侵入は、対流、輻射及び伝導によるものに大別される。

対流については、超伝導空洞をクライオスタット(真空断熱容器)内に納めることにより対応する。

輻射については、クライオスタット内部に 80K 程度の熱シールドを設けることにより低減させる。80K 程度の温度は液体窒素により冷却できる温度であるが、大強度陽子加速器施設においては窒素の放射化が問題となるため一般的にはヘリウムガスが用いられる。また、輻射を抑えるために熱シールドとともにスーパーインシュレータ(SI)が用いられる。一般的な SI はポリエステル製の繊維にアルミを蒸着したもので、20 層程度積層して使用されるが、ポリエステルは放射線によって劣化しやすいので線量の高い場所においてはポリイミド等の耐放射線性の高い材料を使用する必要がある。

伝導の主なパスは、高周波入力カプラ、チューナー、ビームパイプ、空洞サポート、低温ヘリウム系統のパルプ・ジョイント部である。特に、2K 運転の超伝導加速器では冷凍効率が悪いために、伝導を抑えることは非常に重要である。伝導を抑制するためには、4K 程度の液体及びガスヘリウムにより冷却されたサーマルアンカにより除熱し、2K 領域への熱侵入を低減させる。

5. パルス運転における超伝導空洞の振動

超伝導空洞は前述のように板金構造であるのに加えて、空洞自身の強い電磁力により容易に変形される。このローレンツ力は電界強度の 2 乗に比例するために高い加速電界でパルス運転する際には問題となる。本質的にローレンツ力に対する振動を抑制するためには、空洞の強度を増加させることと空洞の両端の拘束条件を強固にすることが有効であることは明らかであるが、種々の設計、製作上の制約により無視できるほど小さくすることは困難である。

Fig.14 に超伝導空洞を短パルス運転(空洞の Filling Time よりも短いパルス長で空洞を励振)した場合の空洞位相の観測結果を示す。図に示されるように、各パルス間で周期の早い成分と遅い成分の振動が観測されていることがわかる。

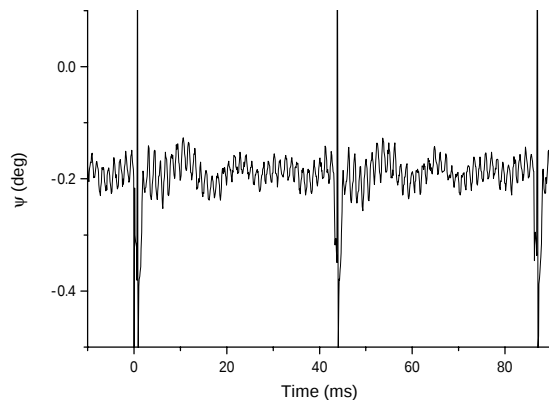


Fig.14 超伝導空洞を短パルス運転した場合の位相測定結果

具体的に、パルス運転時のローレンツ力による変形は以下の2点について問題が生じる。

- (1) 空洞の電圧を立ち上げる時と、フラットトップになった時点での共振周波数が異なってしまうため余計な高周波電力が必要となる。
- (2) パルス状のローレンツ力により空洞が揺さぶられて振動を発生する。

(1)については、チューナーに使用する圧電素子をパルスに同期させて運転することにより補償できることが示されている[7]。しかしながら、圧電素子のパルス同期運転自身も空洞の加振源となっていることに注意しなければならない。

大強度陽子加速器の場合には、特に(2)において電界強度及び位相の揺らぎが生じ、ビームの質が低下してビーム損失をもたらすことが懸念される。これを解決する方法としては、以下が考えられる。

- ・ 1台の高周波源により運転される空洞を1台とし、電界強度と位相の揺らぎを高周波のローレベル制御により安定化させる。
- ・ 電界の立ち上がり時間を滑らかにすることにより振動の高周波数成分を除去し、低周波成分のみとして安定化を図る。

米国 SNS 計画では前者を採用しているのに対して、J-PARC においては後者により1台の高周

波源で2台の空洞を運転することを検討している。

パルス運転時の超伝導空洞の振る舞いや、解析方法については、参考文献[8]、[9]を参照されたい。

6. まとめ

大強度陽子リニアックでは、高デューティ運転時においてその経済性の観点から超伝導リニアックは常伝導リニアックに対して優位である。まして、CW 運転を想定した場合には必然的に超伝導とならざるを得ない。

超伝導リニアックの技術は、主に超伝導電子加速器の技術をベースにしており、常伝導リニアックの技術とは本質的に異なる点が多い。加工技術、表面処理技術、低温技術、材料強度、振動等の多くの観点から総合的に設計・製作を進める必要がある。

参考文献

- [1] Axel Matheisen, "STATUS OF THE RF SUPERCONDUCTIVITY ACTIVITIES AT DESY", Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2001, TL007.
- [2] J. R. Delayen†, "MEDIUM-β SUPERCONDUCTING ACCELERATING STRUCTURES", Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 2001, FA007.
- [3] K. Mukugi et. al., "FRACTURE TOUGHNESS AND MECHANICAL PROPERTIES OF PURE NIOBIUM AND WELDED JOINTS FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES AT 4 K", Proc. of the 9th Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, USA, 1999, TUP042.
- [4] K. Saito et al., "R&D of Superconducting Cavities at KEK", Proc. of 4th Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan, 1989, p635-694.
- [5] K. Saito et. al., "HIGH GRADIENTS IN SUPERCONDUCTING MULTI-CELL CAVITIES", Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Lubeck/Travemunde, Germany, 2003, TuO03.

- [6] T. Higuchi and K. Saito, “DEVELOPMENT OF HYDROGEN-FREE EP AND HYDROGEN ABSORPTION PHENOMENA”, Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Lubeck/Travemunde, Germany, 2003, WeO15.
- [7] J. R. Delayen et. al., “PIEZOELECTRIC TUNER COMPENSATION OF LORENTZ DETUNING IN SUPERCONDUCTING CAVITIES”, Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Lubeck/Travemunde, Germany, 2003, ThP22.
- [8] N.Ouchi et. al., “PULSED SC PROTON LINAC”, Proc. of the XX International Linac Conference, Monterey, USA, 2000, WE205.
- [9] 大内伸夫, ”線形加速器(III)”, OHO’01 テキスト「大強度陽子加速器技術」, 2001, 7-1 ~ 12.

2 超伝導陽子リニアックの応用

1. はじめに

近年の超伝導加速空洞技術の急激な進展を背景として、世界各国で核破砕中性子源や加速器駆動核変換システム(ADS)をターゲットとした超伝導陽子リニアックを中心に研究開発及び建設が進められている。それ以外の超伝導陽子リニアックも多数提案されているが、原研と KEK の共同で現在第 1 期の建設を進めている大強度陽子加速器計画(J-PARC)の 2 期計画で建設を予定している超伝導陽子リニアック、現在建設を進めている米国の核破砕中性子源計画(SNS)、及び原研、KEK で研究開発を進めている加速器駆動核変換システム用超伝導陽子リニアックの概要について述べる。

2. 大強度陽子加速器計画(J-PARC)

2.1. 概要

大強度陽子加速器計画 (J-PARC) は、原研と KEK が共同で原研・東海研究所に建設を進めているもので、核破砕中性子源、原子核素粒子研究、核変換技術開発等を目的とした多目的研究施設である。本施設は 2001 年から第 1 期建設工事が開始された。

Fig.1 に J-PARC の概要を示す。加速器は、リニアック、3GeV ラピッドサイクルシンクロトロ

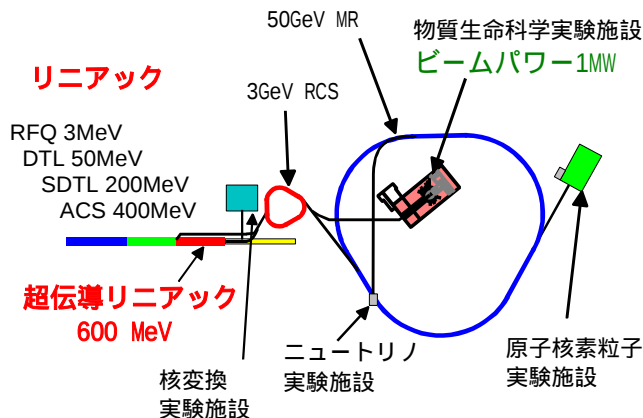


Fig. 1 J-PARC 全体構成

ン(RCS)、50GeV メインシンクロトロロン(MR)により構成される。Table 1 に加速器の主要パラメータを示す。

Table 1 J-PARC の主要パラメータ

	Linac	3GeV RCS	50GeV MR
エネルギー (GeV)	0.4 (1 期) 0.6 (2 期)	3	50
ビームパワー (MW)	0.133 (1 期) 0.333 (2 期)	1	0.75
繰り返し (Hz)	25 (1 期) 50 (2 期)	25	0.3
全長 (m)	250 (1 期)	350	1568

実験施設としては、物質生命科学実験施設、原子核素粒子実験施設、ニュートリノ実験施設、核変換実験施設により構成される。物質生命科学実験施設では、3GeV のビーム (1 MW) を利用して、パルス中性子源やミューオンビームを用いて物質やタンパク質等の構造解明を行うことを目的としている。原子核素粒子実験施設及びニュートリノ実験施設は、50GeV ビームを利用する実験施設である。原子核素粒子実験施設では、K 中間子を用いた基礎物理学研究を行う。ニュートリノ実験施設では、300Km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデまでニュートリノを打ち込み、ニュートリノ振動の実験を行う。核変換実験施設では、原子炉から出る使用済み核燃料に含まれる長寿命放射性物質を安定もしくは短寿命各種に変換するための加速器駆動核変換システムのための炉物理実験及び工学試験を実施する。これらの施設のうち、核変換実験施設は第 2 期計画に建設を予定している。

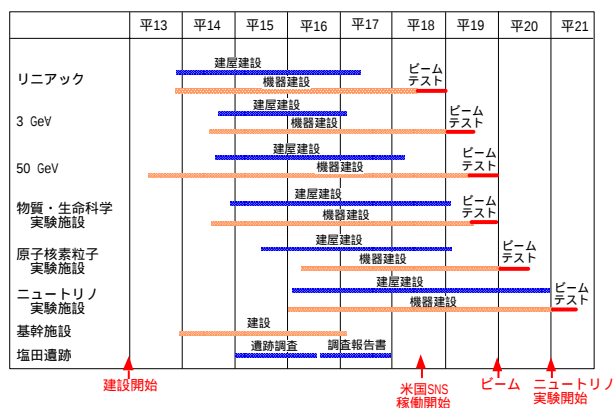
リニアックは、イオン源(50kV)、高周波四重極リニアック(RFQ : 3MeV)、ドリフトチューブリニアック (DTL : 50MeV)、機能分離型 DTL(SDTL : 200MeV)、環状結合型空洞 (ACS:400MeV)及び超伝導リニアック(600MeV)により構成され、RCS へ入射するために負水素イオンを加速する。RCS 入射部において荷電変換さ

れ陽子となり 3GeV まで加速される。RFQ、DTL 及び SDTL の周波数は 324MHz であり、ACS 及び超伝導リニアックの周波数は 972MHz である。

後述する SNS と異なり、J-PARC では 3GeV RCS で加速する必要があることからビーム品質に細心の注意が払われており、SDTL 空洞を採用したのはその一例である。SDTL は DTL のビーム収束用 Q 電磁石を空洞外に配置したものであり、縦方向のトランジション(周波数の変化)と横方向のトランジション(収束周期の変化)を分離することによりビーム品質の向上及びビーム損失の低減を図っている。

第 1 期建設においては常伝導リニアックの建設が実施されている。当初、400MeV までの計画であったが、200-400MeV 分については先送りとなっており、現在の第 1 期工事が完了し次第、製作、据付に着手する予定である。Fig.2 に、J-PARC1 期建設のスケジュールを示す。リニアック及び 3GeV の建家は完成しており、機器のインストールを開始している。50GeV の建家は H18 年に完成の予定である。物質生命科学実験施設および原子核素粒子実験施設の建家完成は H19 年、ニュートリノ実験施設の建家完成は H20 の予定である。リニアックの機器据付調整は H18 年度前半に終了し、H18 年 9 月からビーム試験を開始する予定である。3 GeV へは H19 年 5 月にビーム供給を開始し、3 GeV ビーム試験は H19 年 11 月までの予定である。それ以降、順次 50 GeV、物質生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設のビーム試験を開始する予定である。

Table 2 J-PARC 第 1 期スケジュール



第 1 期計画(400MeV)においては、リニアックは繰り返し 25Hz、パルス幅 500 μ s、平均電流 333 μ A で運転され、RCS に入射される。第 2 期計画においては、リニアックは 400MeV において 2 系統に分岐される。400MeV までの常伝導リニアックは 50Hz で運転され、その内の 25Hz は RCS に入射されるが、残りの 25Hz は超伝導リニアックに入射され 600MHz まで加速した後に核変換実験施設に導かれる。400-600MeV を超伝導リニアックとした理由としては、以下の 2 点が挙げられる。

- ・ 敷地上の制約により超伝導リニアックで全長を短縮する必要がある。
- ・ 実機の加速器駆動核変換システムにおいては、CW(連続ビーム)運転である必要があり、そのための超伝導リニアックの実証試験を行う必要がある。

2.2. J-PARC 超伝導陽子リニアック

J-PARC 超伝導陽子リニアックのパラメータを Table 3 に示す[1]。

Table 3 J-PARC 超伝導リニアックパラメータ

エネルギー	400-600 MeV
周波数	972 MHz
β	0.71-0.79
セル数	9 セル/空洞
空洞数	2 空洞/モジュール
クライオモジュール数	11
全長	57.7 m
最大表面電界強度	30 MV/m
加速電界強度	9.7-11.1MV/m
同期位相	-30 deg
クライストロン数	11 klystrons
全高周波電力	10 MW
負荷 Q 値	$\sim 5E5$

ここでは、9 セルの超伝導空洞を 2 個各クライオモジュールに実装し、最大表面電界を 30MV/m と設定した。これは、 $\beta = 0.6$ の超伝導空洞の試作、

Fig.2 に、J-PARC 用超伝導空洞として開発を進めている 972MHz、 $\beta=0.725$ 、9 セル超伝導空洞の形状を示す。また、Table 4 に空洞のパラメータを示す。表中で、Esp、Eacc、Bsp はそれぞれ最大表面電界、加速電界、最大表面磁界である。



Esp/Eacc	3.07
Bsp/Eacc	5.54 mT/(MV/m)
R/Q	478 Ω
Geometrical factor	208 Ω
Coupling constant	2.80 %

Fig.3 に J-PARC 超伝導リニアックの配置を示す。最終的な配置は未定であり暫定的なものであるが、400MeV 常伝導リニアックから 90° 曲げた後に 58m の超伝導リニアックを配置する。アーク部ではアクロマティックラティスを採用し、90° 直線部では超伝導リニアックの上流側にマッティングセクションを設ける。これらのアーク部とマッティングセクションでは 40m 程度必要となる。

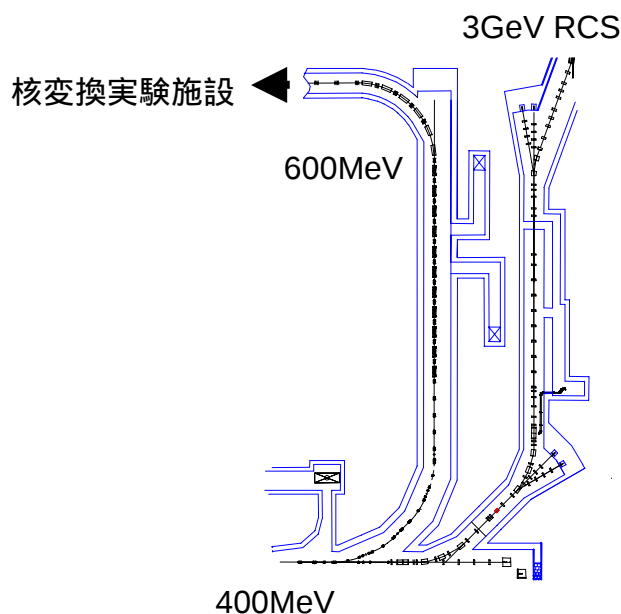


Fig. 3 J-PARC 超伝導リニアック配置

米国で建設が進められている Spallation Neutron Source(SNS)計画は核破砕パルス中性子源に特化した専用の大強度陽子加速器計画であり、6 国立研究所の合同プロジェクトとして 2000 年にテネシー州 Oak Ridge National Laboratory において建設が開始された。現在(2005 年 8 月現在)、リニアックの機器据付調整は終了し、フルエネルギー(1GeV)のビーム試験を開始する状況である[2]。6 国立研究所の分担を以下に示す。

入射器 : Lawrence Berkeley

リニアック : Los Alamos, Jefferson

蓄積リング : Brookhaven

ターゲット : Oak Ridge

中性子装置 : Argonne, Oak Ridge

超伝導陽子リニアック部分は Thomas Jefferson National Laboratory が担当している。

Fig.4 に SNS の概要を示す[3]。SNS はリニアック(1GeV)、蓄積リング及び中性子ターゲットにより構成される。J-PARC では RCS において 400MeV から 3GeV まで加速するのに対して、SNS ではフルエネルギーのリニアックと蓄積リングの構成となっているのが大きく異なる。

Table 5 に SNS の主要パラメータを示す[3]。表に示したものは現在建設を進めているものであり、2007 年から 2011 年にかけてのアップグレードが計画されており、最終的なビームパワー 3 MW を目指す計画である[2]。



Fig. 4 SNS の概要

リニアックは、イオン源(65kV)、高周波四重極リニアック(RFQ: 2.5MeV)、ドリフトチューブリニアック(DTL: 87MeV)、結合空洞型リニアック(CCL: 186MeV)、超伝導リニアック(SCL:1GeV)により構成され、J-PARC と同様に負水素イオンを加速する。RFQ、DTL 及び SCTL の周波数は 402.5MHz であり、CCL 及び超伝導リニアックの周波数は 805MHz である。

Table 5 SNS 主要パラメータ

ビームパワー	1.4 MW
エネルギー	1 GeV
繰り返し	60 Hz
ターゲットでのパルス幅	695 ns
リニアックデューティ	6 %
リニアックピーク電流	26 mA
リニアック長	331 m
蓄積リング周長	248 m
入射ターン数	1060
ビーム損失	1 MW/m

SNS リニアックは、J-PARC と比較すると CCL 及び SCL をより低いエネルギーから採用することにより全長が短くなっていることがわかる。CCL としては、J-PARC が ACS を採用しているのに対して、SNS では Side-Coupled Cavity を採用している。

3.2. SNS 超伝導リニアック

SNS 超伝導陽子リニアックは、中間 β セクションと高 β セクションで構成される。Table 6 に SNS 超伝導リニアックのパラメータを示す[3,4]。

中間 β セクションの長さは 63m、高 β セクションは 94m で全長 157m である。さらに、9 台の高 β クライオモジュールを追加するためのスペース 71m を設けている。(Table 5 に示す全長 331m はこれを含んでいる。)

SNS 超伝導リニアックのヘリウム冷凍設備は、1 次系が 2.1K、圧力 0.041bar で 2.4kW の冷凍能力を有する。これは建設当初時では 100%のマージンを持っており、1.3GeV へのアップグレード時には 50%のマージンとなる。2 次系は 5K で圧力 3bar、運転マージン 100%を有する。熱シールド系統では温度 35-55K、圧力 4-3bar で 50%のマージンを有している。

Table 6 SNS 超伝導リニアックパラメータ

Cavity Temperature	2.1 K
Number of cells per cavity	6
Medium β section	
Output Energy	387 MeV
Cavities per cryomodule	3
Number of cryomodules	11
Coupling constant	1.61 %
Average klystron power	408 kW
Esp/Eacc	2.71
Bsp/Eacc	5.72 mT/(MV/m)
Esp	24.8-30.2 MV/m
Energy gain per cavity	4.61-6.77 MeV
Synchronous phase	-20.5 deg.
High β section	
Output Energy	1 GeV
Cavities per cryomodule	4
Number of cryomodules	12
Coupling constant	1.61 %
Average klystron power	522 kW
Esp/Eacc	2.19
Bsp/Eacc	4.72 mT/(MV/m)
Esp	27.5-37.5
Energy gain per cavity	8.17-14.41 MeV
Synchronous phase	-19.5 deg.

4. 加速器駆動核変換システム

我が国を含めた世界各国で使用済み核燃料から取り出される長寿命放射性廃棄物の核変換技術開発が進められているが、加速器駆動核変換システム (Accelerator Driven Nuclear Transmutation System:ADS)はその一つである。ここでは、原研を中心としたチームによる ADS 用超伝導陽子リニアックについて述べる。

4.1. 概要

Fig.5 に軽水炉新燃料 1t あたりの高レベル放射性廃棄物の毒性指数と再処理経過年数との関係を示す。図に示されるように、核変換を行わない

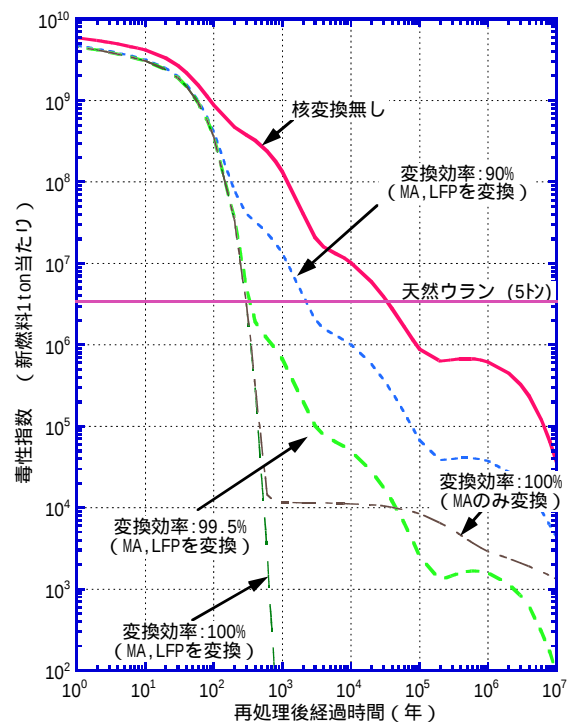


Fig. 5 高レベル放射性廃棄物の毒性指数

場合には、天然ウラン 5t の毒性レベルまで低下するのに要する期間は数万年に及ぶ。これに対して、高レベル廃棄物中のマイナーアクチニド (MA) 及び長半減期核分裂生成物 (LFP) を分離し変換効率 99.5%で核変換を行うことにより数 100 年まで短縮することができる。これによって、長期間にわたるリスクを低減できるとともに、廃棄物量を低減できるために最終処分場の有効利用が可能となる。以上が、核変換技術の目的である。超寿命放射性廃棄物は MA が支配的であるため、核変換技術の主目的は MA を短寿命及び安定核種に変換することにある。

MA は高速中性子による核分裂反応により核変換することが可能であるが、MA を主成分とする炉心においては U-238 を含まないため高速炉の出力上昇を抑制する負のフィードバックで重要なドップラー効果が効きにくいことと、MA 核分裂はしきい反応であるため、炉の安定かつ安全な運転に重要な実効遅発中性子割合が小さいという問題がある。そのため、臨界状態とする通常の原子炉では、運転制御・安全性確保に問題を生じる恐れ

がある。この問題を解決するために、未臨界を大強度陽子加速器による核破砕中性子源によって駆動する ADS が本命視されている。

Fig.6 に ADS の概念図を示す。大強度陽子加速器により加速された陽子ビームを未臨界炉心に入射し、核破砕ターゲットで発生した中性子により未臨界炉心を駆動するものである。本システムの利点は、加速器を停止させれば炉心が停止するため安全性が高いことと、MA を主成分とした炉心を構成できるため変換効率が高いことが挙げられる。Table 7 に原研で提案している ADS の主要パラメータを示す。陽子ビームのエネルギーは 1.5GeV で、ビームパワーは 22~30MW を必要とする。これは、現在建設が進められている J-PARC あるいは SNS のビームパワーよりも 1 桁上回るものであり、ビーム窓における熱衝撃を提言させるために、CW 運転が必要不可欠である。したがって、ADS 用加速器の候補としては超伝導陽子リニアックがもっとも有望である。また、初期炉心の実行増倍率は 0.95 であるが燃焼が進むにつれて低下するために、これを補償するためにビームパワーを可変(22-30MW)とする必要がある。核破砕ターゲットは炉心冷却材を兼ねて Pb-Bi を使用する。炉心の熱出力は 800MW で、それによる発電電力は加速器運転に使用されるとともに、余剰電力を生み出すことが可能となる。初期 MA 装荷量は 2.5t で年 10%の MA を燃

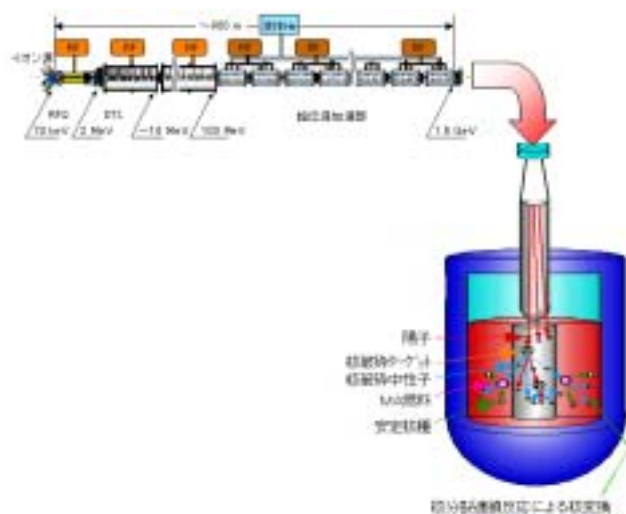


Fig. 6 ADS 概念図

焼させることが可能であり、これは軽水炉 10 基分に相当する。また、燃焼反応度スウィングを抑制するために、初期装荷燃料組成は 40%の Pu を添加している。

Table 7 ADS 主要パラメータ

陽子加速器	
ビームパワー	22 ~ 30 MW
エネルギー	1.5 GeV
運転モード	CW
未臨界炉心	
ターゲット	Pb-Bi
冷却材	Pb-Bi
実行増倍係数	0.95
熱出力	800 MW
MA 初期装荷量	2.5 t
燃料組成	40% Pu + 60% MA 窒化物
変換率	10%MA/年(軽水炉 10 基分)
燃焼反応度	+1.8 %Δk/k

4.2. ADS 用超伝導陽子リニアック

Table 8 に原研・KEK で検討を進めている ADS 用超伝導陽子リニアックの概要を示す。ここでは、J-PARC 超伝導リニアックをベースに検討を進めているため、超伝導空洞のパラメータは同様のものとなっている。

Table 8 ADS 用超伝導リニアックパラメータ

エネルギー	100-1500 MeV
空洞形式	楕円空洞
周波数	972 MHz
セル数/空洞	9
空洞数/クライオモジュール	2
運転温度	2 K
同期位相	-30 °
最大表面電界	30 MV/m

Table 9 に、超伝導陽子リニアックのセクション分割を示す[5]。セクション分割は、同期位相を

-30° に設定していることからビーム力学的に安定な加速を実現するために空洞内の位相スリップを $\pm 30^\circ$ 以下になるように設定した。表に示されるように、100～1500MeV のエネルギー範囲で 10 セクションに分割しており、クライオモジュール総数は 89 台、全長は 472m となった。表から判るように、No.1～3 セクションにおいては、わずか 75MeV を加速するために約 100m を要しており、高エネルギー部と比較して低エネルギー領域において楕円空洞を採用した場合に加速効率が非常に低下している。Table 10 に超伝導空洞のパラメータを示す。表に示されるように、No.3

セクションまでの低 β 領域における空洞の E_{sp}/E_{acc} は 7.4～5.3 と大きくなっており、これが加速効率を低下させている一因である。これは、電界研磨を想定した場合にアイリス径をある程度確保する必要があることに起因する。加速効率低下のもう一つの要因は、超伝導加速空洞の強い加速電界のために、ビーム力学的な横方向の位相進みに比べて縦方向の位相進みが大きすぎる事があげられる。

以上のことから、中間エネルギー領域についてはスポーク空洞等の採用を検討する必要がある。

Table 9 ADS 用超伝導陽子リニアックセクション分割

	Cavity	Beam β	Beam energy	No. of cryomodule	Length (m)
1	0.444	0.435~0.465	103~121	6	27.5
2	0.480	0.465~0.505	121~148	7	32.8
3	0.518	0.505~0.543	148~178	7	33.5
4	0.560	0.543~0.584	178~216	6	29.4
5	0.604	0.584~0.632	216~271	6	30.2
6	0.653	0.632~0.685	271~348	6	31.0
7	0.705	0.685~0.736	348~445	7	37.1
8	0.761	0.736~0.796	445~609	9	49.2
9	0.822	0.796~0.858	609~883	12	67.6
10	0.888	0.858~0.925	883~1517	23	133.7
Total				89	472

Table 10 空洞パラメータ

β	Esp/Eacc	Transit Time	R/Q (Ω)
0.444	7.40	0.634	87.38
0.480	6.27	0.648	121.23
0.518	5.34	0.662	162.67
0.560	4.70	0.673	215.48
0.604	4.07	0.685	278.75
0.653	3.60	0.695	356.10
0.705	3.16	0.702	443.28
0.761	2.84	0.708	543.37
0.822	2.56	0.715	661.44
0.888	2.30	0.721	749.59

Fig.6 に、ADS 用超伝導空洞開発の一環として実施した 972MHz、 $\beta=0.725$ 、9 セル空洞(2 台) の性能試験結果を示す。測定温度は 2 K である。目標最大表面電界 30MV/m に対して、32、34MV/m を達成しており、Q 値についても 10^{10} 以上を実現しており良好な結果を得ている。

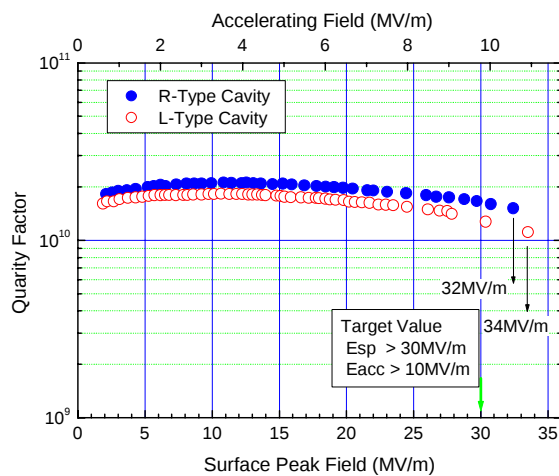


Fig. 6 $\beta=0.725$ 超伝導空洞試験結果

5. まとめ

近年の超伝導加速空洞の急速な技術開発を受けて、種々の超伝導陽子リニアックが検討、提案、建設されている。本稿では、これらのうち J-PARC 超伝導リニアック、SNS 計画及び ADS 用超伝導リニアックを紹介した。

J-PARC では現在第 1 期工事が進められているが、超伝導リニアックは第 2 期工事に位置付けられている。

SNS 計画は現在建設が順調に進められており、超伝導陽子リニアックの高い加速性能がまさに実証されつつある。

ADS は加速器技術と原子力技術を融合したものであり、将来にわたる原子力発電の安定供給にかかわる重要な技術開発項目である。ここでは、CW 運転が必須であることから、超伝導陽子リニアックが最も有望なオプションである。原研と KEK では、ADS 用超伝導リニアックの検討を進めており、100 ~ 1500MeV 領域の概念設計を実施した。今後、中間エネルギー領域を含めた検討を進める予定である。

参考文献

- [1] N. Ouchi, "R&D Status of Superconducting Proton Linac and the KEK/JAERI High Intensity Proton Accelerator Project", Proc. of the 3rd International Workshop of Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators, Santa-Fe, USA, 2002.
- [2] SNS Users Newsletter, The Neutron Pulse, Vol.1, No.6, 2005, http://www.sns.gov/users/neutron_pulse_vol6_no1.pdf.
- [3] "SNS Parameters List", SNS 100000000-PL0001-R13, 2005.
- [4] J. Mammosser, "STATUS OF THE SNS SUPERCONDUCTING CAVITY TESTING AND CRYOMODULE PRODUCTION", Proc.

of the 11th Workshop on RF Superconductivity,
Lubeck/Trabemunde, Germany, 2003, WeO01.

- [5] N. Ouchi et. Al., “DEVELOPMENT OF
SUPERCONDUCTING PROTON LINAC FOR
ADS”, Proc. of the 4th International Workshop of
Utilization and Reliability of High Power Proton
Accelerators, Daejeon, Korea, 2002, in press.