

加速器開発の今後の展開

1. はじめに

中性子科学研究計画では、出力において世界最大級の大強度陽子加速器の建設を目指しており、施設の設計、製作、建設に関して克服すべき技術的課題が少なくない。そのため、これらに関わる事項を検討するために中性子科学研究検討委員会と加速器専門部会が設置され、大強度陽子加速器の基本仕様と技術的課題に関する検討を行った。

平成9年3月31日付けで委員会が作成した答申書では、中性子科学研究計画は着実な実行計画により研究開発を進めていくなれば実現可能なものであり、加速器システムの基本構想は現時点では妥当なものであるが、同時に、最重要開発課題である超伝導陽子加速器の開発については引き続き検討を行うべきこととされた。

2. 検討項目

専門部会での活発な議論の結果、以下のような、基本パラメーターに関する検討項目、および開発課題が取り上げられ、答申書に付随した部会報告書の中に記述された。原研では、これらの結果を参考にしつつ、加速器機器の要素技術開発を進めると共に、概念設計作業の詳細化、基本パラメーターの見直し作業を進めてきた。

2.1 基本仕様に関すること

(1) 加速器の各基本パラメーター等について

- ・リニアックパラメータの最適化
- ・陽子蓄積リングパラメーターの検討
入射エネルギーの評価、蓄積リングとシンクロトロンを選択、
複数のリングの採用

(2) 建設方針とスケジュール

- ・パラメータの変更等を含む柔軟な対応策
- ・段階的なビーム出力の増強策
- ・加速器の製作、据え付けの各段階におけるビーム加速試験

(3) 研究開発体制と人材の養成

- ・研究体制の強化策
- ・人材育成の方策
- ・加速器関連分野技術者の育成

(4) 他の研究機関との協力

- ・KEKおよび内外研究機関、大学、産業界との協力
- ・研究協力の環境造りの方策

2.2 重点開発課題に関すること

(1) 超伝導加速器に関する項目

- ・超伝導加速空洞構造の検討
- ・ビーム力学、超伝導加速器の電場非線形性の検討
- ・クエンチングの回避、超伝導材料の照射損傷・残留放射能の評価
- ・高周波制御、位相のロックの方策
- ・パルスモード運転の際のカプラーの耐電力、位相、電圧、信頼性の評価
- ・生産ラインの適正化、空洞量産、表面処理、品質管理
- ・清浄な真空環境、ガス吸着の回避
- ・加速周波数として1GHz付近を選択する場合の妥当性の評価
- ・冷凍機の製造・運転と費用、2Kでの運転の検討

(2) 低エネルギー加速部に関する項目

加速構造、加速効率の検討

- ・周波数の選択の最適化
- ・高周波増幅器、電子管の信頼性の評価
- ・熱的問題の課題、四極電磁石の成立性の評価

(3) リングに関する項目

- ・リニアックと蓄積リング対低エネルギーリニアックとシンクロトロンと比較
- ・複数個のリングの妥当性
- ・リング入射エネルギーの選択
- ・JHFの開発結果の有効利用、ビーム試験への利用策と問題点
- ・荷電変換薄膜（フォイル）での損失の評価、衝突回数検討
- ・蓄積リングのラティスの高次共鳴の評価

(4) 放射化低減に関する項目

- ・残留放射化、運転時の保守計画、放射化部の局在化策

- ・ハローコレクター、アポート部、ビームダンプの検討
- ・遠隔操作の検討

3. 継続検討課題と対応策

開発課題の中で、特に以下の項目を最も重要な検討課題として位置づけ、今後の設計検討及び技術開発の成果を取り入れて、最適システム設計や仕様決定は暫時的なされて行くべきものとする。

課 題

- (1) 連続運転(工学利用)とパルス運転(基礎研究利用)を両立させるための技術的課題
- (2) 陽子蓄積リングの大強度化へ向けての技術課題、開発戦略
- (3) 加速エネルギー、加速周波数等の各基本パラメータの利用系を考慮した最適化

上記課題については設計計算コードの整備を進め概念設計の精度向上と、各機器の要素技術開発を着実に実施することによって、問題の解決を図る他、以下の対応策を執る

対 応 策

- (1) 低エネルギー加速部の検討を更に詳細化すると共に、超伝導リニアックのパルス運転のスキームを確立する。
 - ・パルス運転とCW運転に特化した2系統の入射器を持つ加速器の概念を構築する。
 - ・超伝導リニアックの電磁場計算、機械強度設計、高周波源のコントロールの評価を高精度化するとともに、試作試験を通してパルス運転の際の制御性を実証する。
- (2) 段階的な開発戦略を立てる
- (3) JHF、SNSやESS等との協力関係を密にして、その研究の成果を参考にしながら柔軟な開発体制を組む。(周波数については補遺)

6. 開発の現状(2月以降の進展)

- (1) 超伝導空洞試験の進展
- (2) 負イオン源の実験継続
- (3) CW-RFQのハイパワー試験器の製作試験
- (4) CW-DTLのゴールドモデル試験(ポストカップラーの効果の評価)
- (5) ビームダイナミクス計算の進展
 - DTLのシステム構成
 - 高βリニアックの構成(1空洞4セルから5セルへ変更)
 - Equipartitioningの考え方の取り入れ
- (6) 陽子蓄積リングの基本概念の構築

ビームトラッキング計算コードの開発と整備
荷電変換方式の検討

7. 今後の開発スケジュール

7.1 概念設計の詳細化（概念設計書のとりまとめ）

加速器システム設計の精度向上、ビームハローの評価
超伝導クライオモジュールの設計検討
冷凍機（2K運転を想定）の設計検討
制御系
ユーティリティー

7.2 機器の開発

(1) 超伝導加速器

- ・ 単空洞の開発の継続
- ・ 多連空洞の製作

(2) 負イオン源の製作

(3) CW-RFQの熱試験

(4) 低エネルギー用高周波源の改良

(5) CW-DTLのコールドモデル試験と熱試験

(6) 空洞入力カップラー試験用高周波源(600MHz)の整備

(7) 蓄積リングの空洞の材料（フェライト）等の特性試験

(8) 開発試験エリアの整備（電源の増力）

加速周波数について

陽子加速器研究室

1. 加速周波数について

線形加速器などの高周波電力を用いて粒子を加速する加速器では、加速周波数はその構成を決定づける上で重要な意味を持つ。すなわち

- ①加速周波数により空洞の構造が決定的に異なる（周波数が大きくなると周波数に反比例して構造が小さくなる）。
- ②周波数帯域によって利用できる高周波源（増幅器）が異なる（例えば300MHz以下のVHF領域では3極管あるいは4極管などの真空管、UHF領域ではクライストロンが使用できる）。

中性子科学研究用加速器では、RFQとDTLを含む低エネルギー加速部で200MHz、超伝導リニアックの高エネルギー加速部で600MHzを想定して開発を進めてきた。

2. 低エネルギー加速部で200MHzを選択した理由

原研での大強度加速器の開発は将来の工学的な利用（放射性廃棄物消滅処理等）を念頭に置いてスタートした。そのため、安全性、信頼性、コストの評価などを考えると、可能な限り実証済みの技術を利用したいという大前提を建てて開発を進めることとした。

開発を開始した1991年の時点では、加速周波数の選択に際して以下に挙げる幾つかの理由が考慮された。

- ①営業運転を行っているリニアックはすべて200MHzで運転されており、ビーム出力1MW以下では200MHzのリニアックは信頼性も高く、確立された技術と見なすことが出来る。
- ②大出力加速器では加速管内の除熱の問題が最も重要であり、低い周波数を選択して構造を大きくし、加速空洞における単位体積あたりの発熱密度を減ずることが重要である。
- ③低い周波数を選択し、ビーム径を大きく採れば、ビームサイズ対ビーム穴の比を大きく取ることが出来る。結果としてビームスピルを少なくする効果も期待できる。
- ④核融合用低周波プラズマ加熱に用いられる高出力四極管の開発が進み、信頼性が向上してきた。
- ⑤コストと信頼性に関する評価については、200MHzに豊富な実績がある。
- ⑥メーカーと協力して開発を進めることを想定すると、技術的な蓄積のある従来型の200MHzが有利である。
- ⑦多目的な応用を考えると、正負ビーム同時加速を行う必要があり、前段加速部と後段加速部との間で、位相を回すことなく同時に加速位相に乗せるためには周波数のジャンプは奇数倍の方がよい。

3. 周波数再検討の理由

平成8年度に開催された中性子科学研究検討委員会の加速器専門部会では、原研が提案してきた上記加速周波数に対する考え方に対して以下のような意見が出された。

- ①大電流を加速する加速器では、ビームの漏れを最小限にするためにビームの質の向上が最も優先されるべきである。最新のビーム物理の研究結果では、周波数が高い方がビ

ームの質は良いとされている。なぜなら周波数が高い場合、同じ平均電流を加速する際バンチあたりの加速粒子数を下げることが可能であるために空間電荷効果によるビーム質の劣化を小さくすることが可能となるからである。

②低エネルギーからの周波数のジャンプは可能な限り少ない方がビームの質が保存される。高エネルギー加速部を～600MHz帯に想定した場合、200/600MHzの組み合わせでは3倍の周波数ジャンプが必要となる。

③200MHzでは現在のところ高周波源として四極管しか利用できない。一方、300MHz近傍ではクライストロンを使用することが可能である。クライストロンの方が信頼性が高く、また、増幅率が高い（～40-60dB）ため、初段のドライバー回路が簡単となる（四極管は3段の増幅を必要とする）。さらに、四極管では将来に渡る継続的な供給に不安がある（従来、放送器用のマイクロ波増幅器は、真空管が使用されてきたが、暫時固体素子化されつつあり、真空管の使用が減少しつつある）。

4. 世界的な加速器の周波数の現状

加速周波数の最適な選択に対しては、加速器の使用目的により様々な考え方が提案されている。現在稼働中の大強度陽子加速器は全て例外なく200MHzの低エネルギー部から構成されている。

稼働中の主な200MHz陽子加速器

米国： LANL、ANL、BNL、FNAL
欧州： RAL、CERN、SATURNE、HERA
ロシア： MMF
日本： KEK

一方、最近計画されている加速器では、一般的には周波数は高い値を選択する傾向にある。しかし、あらゆる加速器に対して適応可能な統一された考え方はまだ確立されていない。

提案されている主な計画

米国： APT 350/700MHz、 NSNS 402.5/805MHz
欧州： ESS 175/350/700MHz、 TRISPAL 350/350MHz
ロシア： ITEP 200/600MHz
日本： JHF 324MHz（200MeVまで）、NSP 200/600MHz

5. 技術開発の現状

これまでに実際に大電流ビーム加速のために試作機が製作され、実験的な検証が行われた例は比較的少ないものの、1980年代からカナダ、米国を中心に、核燃料増殖、核融合炉材料試験、防衛関連等の目的で要素技術開発が実施された。

大出力（CWまたは高デューティー）加速器の実績

LANL FMIT（80MHz、2MeV）のRFQを製作、運転
CRNL CW-RFQ（267MHz、600keV及び1.2MeV）を製作、運転

LANL GTA (425MHz RFQ 2.5MeV、DTL 7MeV、20K運転)を製作、運転
ANL CWDD(352MHz、2.5MeV、26K運転)製作
KEK JHF(432MHz、3MeV)製作、運転
JAERI RFQ(200MHz、2MeV)製作、運転

LANL APT用の入射器のフルモックアップ器LEDAで350MHzのRFQを製作中
1998年度中にビームを出す予定である。

6. 検討作業の内容

現在、200/600MHzと350/700MHzとの特性を比較するためのビームダイナミクス、機械設計検討を進めている。超伝導リニアック部分の評価については600MHzと700MHzに関しては基本的な差異はないものと考えられるためここでは主に低エネルギー加速部(RFQとDTL)での検討結果を述べる。

①ビームダイナミクス検討によるビームの質の比較

- ・ PARMILAによるビームシミュレーションの比較では200/600と350/700との間にrmsエミッタンスで見ると限り明確なビームの質の差は現れていない。
- ・ ビームハローを考慮した詳細な計算が必要であるが、ビーム軌道に関する理論計算は、様々な考え方による計算があり、統一された考え方はまだ確立されていない。今後ビームハローの評価を進めるが、原理的には350MHzの方がビームの質は良いことが期待される。しかし、実験的な検証が必要である。

②質の良いビームを得るためのマッチング等調整のしやすさ

- ・ 周波数ジャンプが2倍を取った方がビームのマッチングを取るの容易である。
(周波数自体の200と350MHzの間では明確な差はない。)

③機械構造的な見地からの検討(熱負荷、冷却構造の問題)

- ・ 200MHzの場合にはR&Dの結果から、2MeVでCW加速器(1.5MV/m)を製作することはDTのみならば実現可能である。但し、カップラー、RFコンタクト方式、チューナー等の熱試験はまだ実証の要あり。
- ・ 350MHzの場合には、3MeVで1.2MV/mが限界である。RFQの出口エネルギーを高くする長尺RFQの製作(我が国には実績がなく、LANLでのLEDAでこれから試験が行われる)か、加速電界を更に小さくして長いDTLを作る必要がある。しかし加速電界を下げれば、equipartitioningの条件を保持するために、ビームサイズを大きくする必要がある。

③DT内集束系の高磁場の実現性とDT内の熱負荷による冷却構造の検討

- ・ 200MHzの場合は実証済み
- ・ 350MHz(3MeV、1.2MV/m)では $\sim 150\text{T/m}$ の磁場が必要となり、電磁石を使用する場合、困難が予想される。今後モックアップ試験体を用いて実証試験をする必要がある。
- ・ 更に高い加速周波数に関しては永久磁石を使用する必要がある(CW加速器を使用する工学的な利用には不向き)。

④コスト

- ・ 350MHzでは、加速器長が長くなることと、加速セル数が大幅にアップ、製作精度への高い要求等から建設費は増加することが予想される。

⑤信頼性

- ・ 200MHzでは四極管に関しては信頼性に疑問がある。
IOT、ダイアクロードなどの新たな高周波源を開発する必要がある。
- ・ 350MHzではクライストロンが利用できるために信頼性の観点からは有利。
同波管を用いた立体回路はかなり大がかりな装置になる

⑥ 高周波源に関して（200MHz及び350MHzに共通）

- ・ 最適な構成、必要総電力、分担する増幅器の個数、単体としての出力、組み合わせ、配置等の検討を、要素技術の開発と並行しつつ行う必要がある。

7. 周波数組み合わせの可能性

加速周波数の選択には、以下に示すように様々な可能性が考えられる。利用系を考慮した最適な選択には、開発スケジュール、建設スケジュール、将来へのアップグレードへの担保、資金計画等との緊密な関係があり、建設へ向けての最終決定には、更に時間をかける必要がある。しかし、どれかの組み合わせがそれ自体として優位性を明確に主張出来るのではなく、それぞれに一長一短が認められる。

- ① 200/600MHzの組み合わせ
- ② 300/600MHzの組み合わせ
- ③ 350/350MHzの組み合わせ
- ④ 324/648MHzの組み合わせ
- ⑤ 324/972MHzの組み合わせ
- ⑥ 350/700MHzの組み合わせ
- ⑦ 350/1050MHzの組み合わせ

8. 中性子科学研究用加速周波数に対する考え方

上記の議論の結果、3の項で指摘された問題点はまだ確定的な結論が見いだされていないものの、2項で述べた現選択の利点を考えると積極的にこれまでの選択を変更する必要は、現時点ではないと思われる。しかし、パラメータの最適化の作業は、製作設計に着手するぎりぎりまで（あるいは場合によっては建設が着手された後でさえも）努力しなければならぬと課題だと考えられる。中性子科学研究用加速器の周波数としては 200/600MHzの組み合わせを中心として（レファレンス）、他の組み合わせを（オプション）と位置づけて開発を進めていきたい。

概念設計、要素技術開発と並行して、国内外の開発計画（JHF、NSNS、ESS、APT）等の動向を注意深く観察し（また、密接な協力関係を保持しつつ）、可能な限り柔軟な開発体制を組んでいくことが肝要である。