

[08-S02]

ACCELERATOR COMPLEX FOR THE JOINT PROJECT OF KEK/JHF AND JAERI/NSP

Motoharu Mizumoto, Yoshishige Yamazaki*

Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

*High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

Abstract

The JHF of KEK and the NSP of JAERI were joined to form one project in order to promote a wide range of scientific and engineering fields included in either of the projects. The Joint Project is planned to consist of two phases. Phase I comprises a 600MeV linac, a 3GeV, 1MW rapid cycling synchrotron and a 50GeV synchrotron. Phase II is the upgraded system, which includes a several MW pulsed spallation neutron source. The high energy linac from 400MeV to 600MeV in the Phase I will be a superconducting one which is the most crucial accelerator techniques for realizing an accelerator driven nuclear waste transmutation system. The R&D results accomplished for the Joint Project are briefly summarized.

大型ハドロン計画 (KEK) と中性子科学研究計画 (原研) の統合計画用加速器

1. 統合計画の概要

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (原研) は世界最大強度の陽子加速器群を建設し、それを用いて、生命、物質、素粒子、原子核、先進型原子力技術などの最先端科学の研究を協力して推進する共同プロジェクトを提案している。この新しい提案は、両機関がこれまでに各々提案してきた大型ハドロン計画(JHF)¹⁾、中性子科学研究計画(NSP)²⁾を統合して推進するものである。

KEKの大型ハドロン計画は、KEKにおける次期加速器計画であり、加速器は、200MeV リニアック、3GeV ブースターリング、50GeV 主シンクロトロンリングからなり³⁾、それらのビームを利用する4つの研究施設、1)素粒子・原子核物理用の K-アリーナ、2)ミュー中間子用 M-アリーナ、3)中性子散乱実験用 N-アリーナ、4)短寿命核用 E-アリーナ及びニュートリノ振動用ラインから構成される。

一方、原研の NSP 計画は、核破砕中性子源を用いた中性子散乱研究の推進や、高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核種の加速器駆動消滅処理等の研究開発を目的としている。加速器は、超伝導加速空洞を主体とする 1.5GeV、8MW 超伝導リニアックからなり⁴⁾、主要研究施設は、中性子散乱研究用 5MW 核破砕パルス中性子源、加速器駆動消滅処理実験施設、中性子核物理、材料照射、不安定核イオンビーム科学等の研究施設である。これらを建設するために、大電流入射器、超伝導加速技術、大出力核破砕ターゲットなどの技術開発を進めてきた。

2. 加速器の概要

統合計画の目指す学問分野は、極めて学際的な領域を包括する。このための陽子加速器は、数 GeV 及び数 10GeV のおのおのエネルギー領域でそれぞれ MW 級のビーム出力を目指す 3GeV 及び 50GeV の二つの陽子シンクロトロンと、そのための入射器であるリニアックで構成される。このような大きな強度の加速器では、そのビーム損失の低減は極めて

大きな課題である。これは単に放射線遮蔽の観点のみならず、加速器の長期安定運転のための維持保守作業における被爆の軽減の点から重要である。

統合計画は Phase I、Phase II に分けられ、Phase I では核破砕中性子源へのビームパワーを 1MW とし、Phase II ではさらに数 MW まで増強する。Phase II での加速器についてはいくつかのオプションを用意し、Phase I での経験を踏まえて最良のものを選択する。

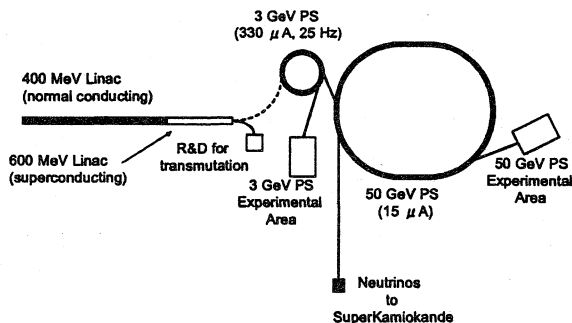


Fig.1 Phase Iにおける統合計画陽子加速器群の概要

2.1 加速器の構成

統合計画の陽子加速器の概要を Fig.1 に示す。Phase I では、(1) 600MeV 線形加速器、(2) 3GeV シンクロトロン(RCS)、(3) 50GeV シンクロトロンから構成される。50GeV シンクロトロンの繰り返しは 0.3Hz であり、平均強度は 15 μA である。リニアックは 3GeV-RCS の入射器および消滅処理実験用であり、繰り返しは 25Hz ないし 50Hz の運転で、パルス幅 500 μ sec、ピーク電流 50mA の負水素イオンビームを加速する。3GeV-RCS への入射エネルギーとしては第一段階では、400MeV、最終的には 600MeV が用いられる。一方、600MeV のビームは消滅処理実験にも用いる。

3GeV-RCSの1MWのビームは核破砕中性子源に用いられる。更に、ミューオン源、及び不安定原子核の生成等への利用も検討されている。最終段の加速器である50GeVリングからのビームは、遅い取り出し方式でK中間子を主体とした素粒子・原子核の実験ホールに導かれる場合と、ニュートリノの長基線実験のために1ターンで取り出される場合の二つがある。長基線実験では250km離れたスーパーカミオカンデを検出器として用いる。さらに将来には韓国、中国との国際協力も視野に入れた長距離の実験も検討している

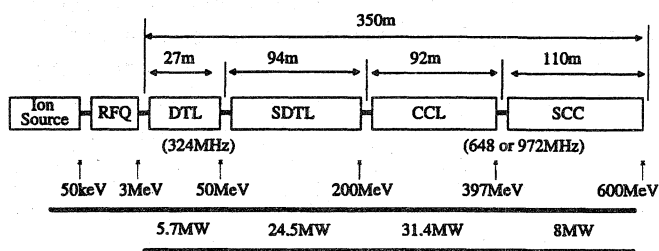


Fig.2 リニアックの構成図

2.2 リニアック

Fig.2にリニアックの構成図を示す。リニアックはエネルギー400MeVまでは常伝導、400-600MeVは超伝導を予定している。400MeVまでの構成は、体積生成負イオン源、3MeV RFQ (高周波四重極リニアック)、50MeV-DTL (ドリフトチューブリニアック)、200MeV-SDTL (分離型 DTL) 400MeV CCL (結合空洞型リニアック) である。全長は約250mで、SDTLまでのRF周波数は324MHzである。CCLとSCC (超伝導リニアック) 部はその周波数を648MHzまたは972MHzとし、SCCでは、5ないし7セルの空洞を2セットで一つのクライオモジュールに装荷する。ひとつのクライオモジュールの長さは3~4mである。加速電場勾配としてはすでにこの種の空洞では世界最高の8.8MV/mのもの開発に成功している。リニアックの基本的な部分の開発はKEK及び原研でそれぞれ進められている。

Table 1 Main parameters of the 600MeV linac

Energy	600MeV
Repetition	25Hz-50Hz
Beam Pulse Width	500μs
Chopping Rate	57%
Frequency	
RFQ, DTL, SDTL	324MHz
CCL, SSL	648 or 972MHz
Peak Current	50mA
Linac Average Current	625μA
After Chopping	333μA
Total Length of DTL, SDTL, CCL and SCC	350m

2.3 シンクロトロン

3GeV-RCSのラティスはsuper period 3のおむすび型とし、3つのモジュールからなる3セルDOFOを基準とする。入射、取り出し、およびRF加速空洞設置用に約25mのstraight sectionを設ける。周長は約300mとなり、入射時のビームエミッタンスは $220\pi\text{mm.mrad}$ を想定する。

50GeVシンクロトロンのラティス設計の最大の特長はtransition γ がimaginaryすなわち、トランジションエネルギーが無い設計となっていることである。リングのsuper periodは2のレーストラック型であり、100mの長さのstraight sectionと44mのshort straight sectionがそれぞれ2つある。リングの全長は約1500mである。ビーム強度は $3.2 \times 10^{14}\text{ppp}$ であり、偏向磁石数は92台、4極電磁石数は184台である。入射時のビームエミッタンスは $54\pi\text{mm.mrad}$ である⁵⁾。

3. リニアック要素技術開発

JHF及びNSP計画共に大強度化に伴う様々な困難を克服するための加速器要素技術開発を進めてきた。以下に、それらの結果を簡単にまとめる。

3.1 低・中間エネルギーリニアック

近年、加速周波数の高いリニアックではDTLへの入射を容易にするために高いエネルギーのRFQを使用する傾向があり、この傾向はJHP計画で進められた432MHz、3MeV-RFQによって始められたといつてよい。JHF-RFQは π モード安定化ループPISLの発明によって実現された。現在、この加速器で13mAのH⁺ビームを加速している⁶⁾。また、陽子エネルギー50MeV以上ではSDTLが使用される。SDTLはDTLと異なり、DTLごとに集束磁石を挿入せず幾つかのタンクに分離し、集束磁石はその外に配置する。その結果DTの大きさを最適化することが出来、シャントインピーダンスを大きく取り、加速効率を向上させることが可能となる。通常のDTLと比較してこの領域では40~65%の向上を図ることが可能となる⁷⁾。3GeV-RCSに入射するためにビームをチョップするチョッパーは3MeV-RFQの後方でRFを用いて行い、現在1%のビームロス为目标としてチョッパーの設計を進めている。

一方、NSP計画で開発が進められたRFQはJHFの数%のDutyと比較して非常に高いDutyの運転を目標とした。そのため200MHz-RFQを製作し、2MeVのエネルギーで10%Duty、70mA、更に1%で100mAのH⁺ビーム加速が行われた⁸⁾。また、DTLの最初の9セルよりなるハイパワーモデルでは2MV/mで20% 1.5MV/mで50%Dutyの運転が行われた。統合計画ではPhase II段階で15%の運転も視野に入れて開発が進められる。

3.2 高エネルギーリニアック

200-400MeVのエネルギー領域についてはKEKで開発されたCCL加速器の一つである、ACS (Annular Coupled Structure)が常伝導部の有力な

候補とされる。ACS では加速電場の軸対称性がよくビームの質の劣化を防ぐことが可能なことが大きな利点であり、シャントインピーダンス、及び空洞間の結合常数などについては一般的に利用されている側結合型空洞と遜色がない⁹⁾。

400-600MeV のエネルギー領域で使用される予定の超伝導リニアックに関しては、加速空洞の開発が原研と KEK との協力で過去数年間に渡り進められてきた。陽子エネルギー145MeV ($\beta=0.5$) と 1.1GeV ($\beta=0.89$) に相当する領域でそれぞれ最大表面電界 44MV/m、47MV/m の値が得られた。これらの成果は KEKTRISTAN 用に開発された電界研磨などの技術をベースに行われた¹⁰⁾。

超伝導リニアックは一般的には連続運転 (CW) モードで運転する際のエネルギー効率が良いため、NSP で目的とする消滅処理などの工学利用に欠かすことの出来ない技術である。統合計画で想定されているパルス運転についても 5MW のビームを想定すると充分長い Duty の運転が必要となり、超伝導の利点を生かすことが出来る。また、加速電界が高いことによる加速効率の向上、大きな蓄積エネルギーによる安定な運転、大きなボア半径による、少ないビームの損失などの有利な点を有する。

しかし、超伝導リニアックをパルス運転し、シンクロトロンの入射器として利用する際、エネルギーの広がりに対して厳しい条件が課せられるため、空洞のマイクロフォニックな振動、ローレンツ力による変形、ビームローディングによる影響などに起因する加速電場の変動を極めて小さく押さえるための高周波の位相・振幅の高い制御性が要求される。

3.4 その他の開発

JHF のイオン源は規格化 90%エミッタンスでセシウム添加無しで 0.5 π mm.mrad、16mA のピーク電流が得られ¹¹⁾、NSP では、セシウム添加で 21mA (33mA/cm²) で 5%Duty の運転が可能である¹²⁾。LEBT についてはソレノイドを用いて 3 次元の幾何学的なアベレーションを低減する設計を行った。また、LEBT を通して高い輝度を保証する空間電荷中和効果が実験的に検証された。

4. 加速器の増強

Phase I では、Phase II へ向けての増強のシナリオを念頭に置いて試験運転を実施し、その結果によって 5MW を達成する方式を決定する。可能性の高い方法として 2 つの案が考えられる。1 つは Phase

I で建設した RCS の出力エネルギーを最高 6GeV まで上げ、さらに電流 400 μ A 以上に増加させる。この RCS をもう一台建設して約 5MW を達成する。もう 1 つの案は、リニアックのエネルギーを 1GeV まで増強し、2 つないし 3 つの蓄積リングを用いて短パルスを発生させ 50Hz で稼働させる案である。これらの増強の案を Table 2 に示す。Phase II の建設開始までに、Phase I での経験と実績をもとに、技術的な面および建設コストを含めてこれらのシナリオの最終的な選択を行う。

参考文献

- (1) JHF Project Office, "JHF Accelerator Design Study Report" KEK Report 97-16 (JHF-97-10)
- (2) 中性子科学研究センター, "中性子科学研究計画における研究開発", JAER-Tech, 99-031, 1999
- (3) Y. Yamazaki, "The Japan Hadron Facility Accelerator", Proc. Of 1st Asian Part. Accel. Conf. (APAC98), 23-27 March 1998, Tsukuba, p319
- (4) M. Mizumoto et al., "A Proton Accelerator for Neutron Science Project at JAERI", ibid. p309
- (5) Y. Mori, "Japanese Hadron Facility", Proc. Of 1997 Part. Accel. Conf. 12-16 May, 1997, Vancouver, p920
- (6) A. Ueno, "Proc. Of 1996 Linac Conf. 24-28 Aug. 1996, Geneva, p293
- (7) T. Kato, KEK report,
- (8) K. Hasegawa et al. "Development of a High Intensity RFQ at JAERI", Jour. Of Nucl. Sci. Technol. 24, 662 (1997)
- (9) T. Kageyama et al., Part. Accel. 32, 33 (1990)
- (10) N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI" Proc. 1998 Applied Superconducting Conf. (1998)
- (11) A. Ueno et al., Proc. 1996 Linac. Conf., 293 (1996)
- (12) H. Oguri et al., "Development of an Injector Section for the High Intensity Proton Accelerator at JAERI" Proc. 1998 European Part. Accel. Conf. (1998)

Table 2 Upgrade path of Linac and Ring

RCS or SR				Linac(56% chopping)				
Beam Power (MW)	Energy (GeV)	Repetition (Hz)	Number	Energy (GeV)	Peak Current (mA)	Pulse Length (μ s)	Repetition (Hz)	Average Current (μ A)
1.0	3	25	1	0.4	50	500	25	333
5.0	6	25	2	0.4	60	500	50	833
5.0	1	50	2 or 3	1	60	3000	50	5000
5.0	4	25	2	0.6	60	750	50	1260