

高エネルギー加速器セミナー OHO'05

IFMIF 計画

～ 核融合炉材料開発のための大強度重陽子加速器 ～

杉本昌義(原研)

1. IFMIF 計画-核融合材料開発のための大強度重陽子加速器

1. はじめに

核融合炉は人類の繁栄を維持するための究極のエネルギーであるとされているが、その開発段階は、ようやく、最近、国際核融合実験炉（International Tokamak Experimental Reactor, ITER）の建設場所が合意されたところであり、今後、発電システムとしての成立性を確かめる実証炉（DEMO）を経て、実用化されるのは半世紀後となることが予想されている。Fig. 1 に現在、もっとも現実的と考えられる D-T 反応を用いたトカマク方式による発電炉の構成を示す。

一般報道などでは、プラズマの温度・閉じ込め時間の性能が向上し、ブレイクイーブンに到達といった記事を見かけるが、燃焼したプラズマからどうやって効率的に電力を得るのか、また、自然界に存在する資源量としては限られているトリチウム燃料を運転しながら再生産可能かといった、いわゆる核融合炉工学の分野の開発も必要不可欠である。とりわけ、プラズマから発生する熱と中性子にまともにさらされる第一壁と呼ばれる部分の材料については、これまでに経験のない厳しい環境に置かれるため、核融合開発の当初より照射試験による性能実証が不可欠とされてき

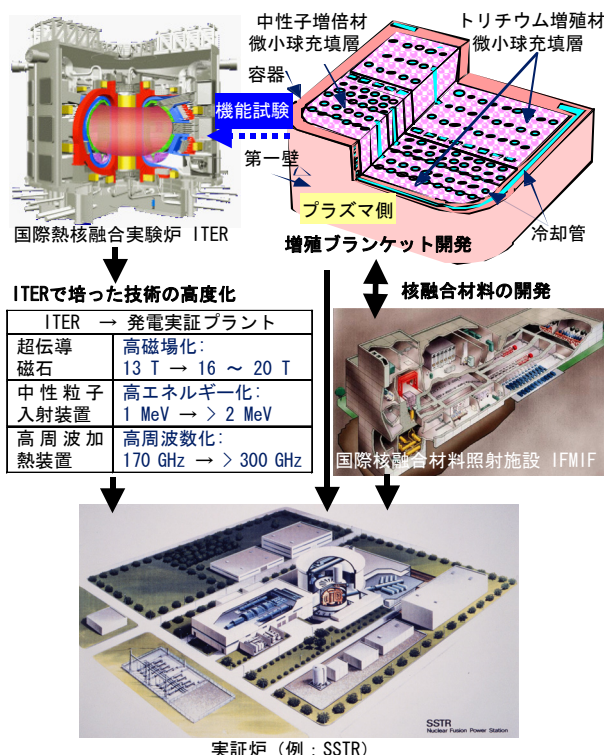


Fig. 2 DEMO 炉を目指した炉工学技術開発

た。Fig. 2 に DEMO を目指した今後の炉工学開発の流れを示す。

核融合炉の実現には DEMO 相当でも 10-15 MW 年 / m² の中性子に耐える材料が必要であるため (Fig. 3)、その開発には 14MeV 強力中性子源が不可欠であるとの国際認識のもと、重陽子-リチウム (D-Li) ストリッピング反応による加速器型中性子源を国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF) として選択し

技術開発が進められてきた。Fig. 4 に各種中性子源の中性子スペクトルを比較する。D-Li 中性子源は重陽子エネルギーを 35~40MeV にすると、ちょうど D-T 反応の 14MeV 中性子に相当するところにピークを合わせることができる。その一方、20~50MeV に及ぶ高エネルギー成分も生じるため、その材料照射への影響を懸念する向きがあり、丹念な評価研

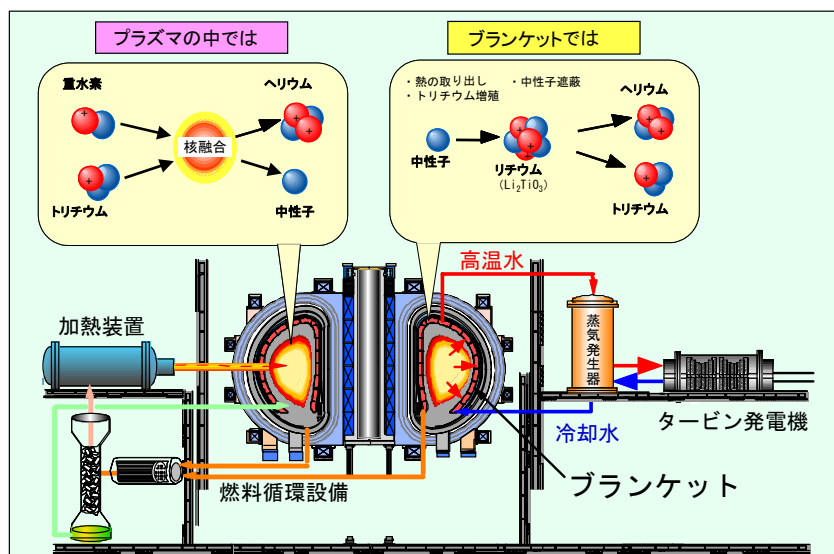


Fig. 1 トカマク型 D-T 核融合発電炉の原理図

究がなされてきた。その結果、Fig.5 に示す弾き出し損傷量 (dpa) と核変換ガス生成量 (He-appm) の2パラメータを合致させることで十分な模擬となし得ると結論している。

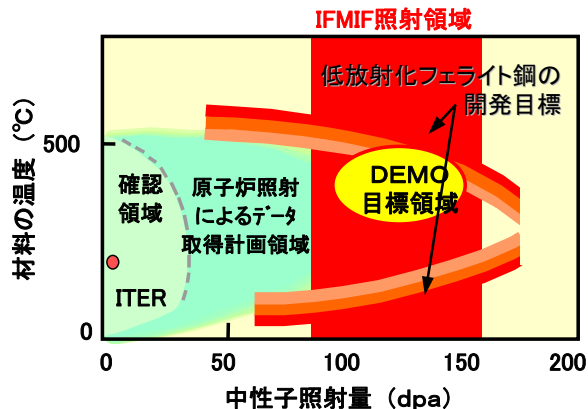


Fig. 3 実証炉の実現に向けた材料開発目標

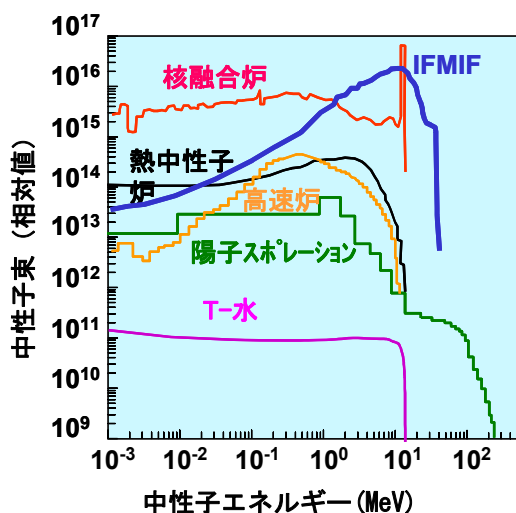
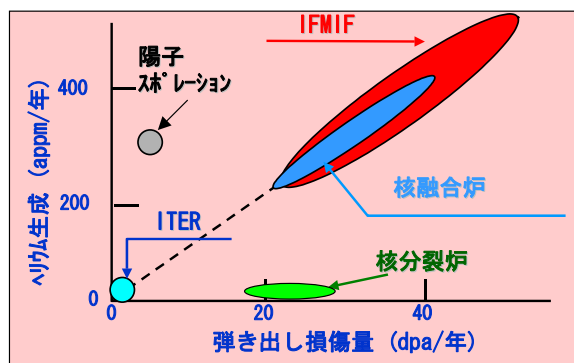


Fig. 4 各種中性子源の中性子スペクトル



dpa: 原子当たりの弾き出し回数(displacement per atom)
appm: 核変換濃度 (atom part per million)

Fig. 5 各種中性子源の材料照射特性比較

IFMIF は、40MeV、125mA の CW 加速器を 2 台用いて計 10MW の重陽子を液体 Li 流(窓なし)にあて、 10^{18} n/m²/s を超す中性子照射場をつくる。照射損傷生成速度 50dpa/年の照射領域を 0.10、20dpa/年を 0.50 実現することが目標である。約3年間で100dpaに達する照射損傷を達成しようとする、70%の稼働率が求められる。IFMIF 施設の全体予想図を Fig. 6 に示す。

重陽子リニアックを用いる材料照射用の中性子源計画は、1970 年代に始まる。Table.1 に現在の IFMIF に至る経緯を示すが、残念なことに、いずれも計画のみで、実現に至っていない。ところで、今の IFMIF の設計仕様に収束するまでには、いろいろな検討が幅広く行われてきており、加速器だけに限っても、baseline に対して、alternative という位置付けのもの、optional として考えられたものなどがあり、以下の章でできるだけ、それらに触れるようにしたい。

Table 1 材料照射 (CW) 加速器型 D-Li 中性子源計画

年代	計画	仕様
1975	米国 BNL [1]	30MeV, 100mA, 入射 500kV, Alvarez 50MHz
1976	米国 ORNL/ Fermilab [2]	40MeV, 100mA, 入射 350kV, Alvarez 60MHz
1977	ドイツ KfK [3]	40MeV, 100mA, 入射 750kV, Wideroe 27MHz and/or Alvarez 54MHz
1979	FMIT: 米国 LANL/HEDL [4]	20/35MeV, 100mA, 入射 100kV, RFQ (2MeV)+Alvarez 80MHz
1994	原研 [5]	10-40MeV (5MeV 間隔で選択可), 50mA, 入射 75kV, RFQ (2MeV)+Alvarez 120MHz
2004	IFMIF [6]	40MeV, 125mA x 2 式, 入射 95kV, RFQ (5MeV)+Alvarez 175MHz

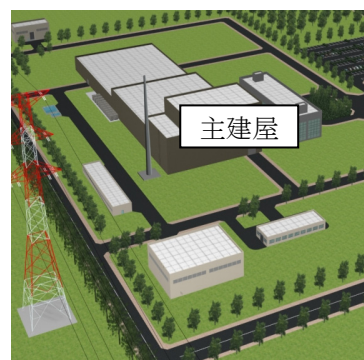
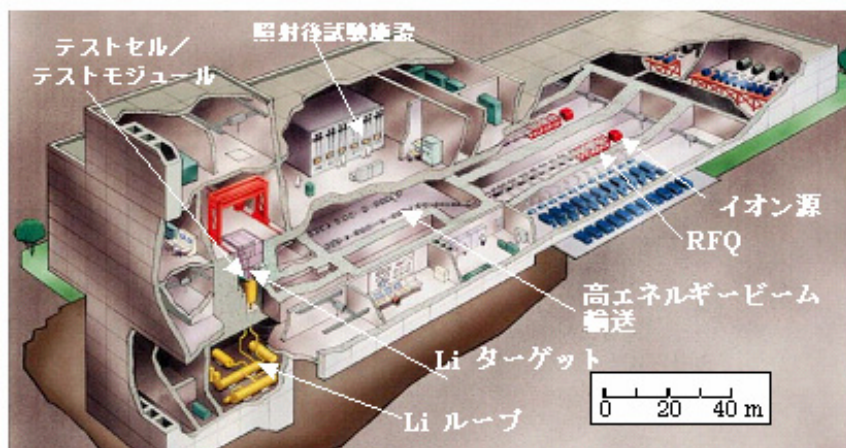


Fig. 6 IFMIF の全体予想図 (左：主建屋、右：関連施設含む施設全体)

2. IFMIF 計画とは

2.1. 目的と必要性

IFMIF の目的は、材料照射試験に必要とされる、核融合炉の稼働期間に相当する強度と照射体積を有する加速器型 D-Li 中性子源を実現し、材料照射データを生産することにある。

核融合開発の国際プロジェクトである ITER では、炉心プラズマ技術（核燃焼プラズマ、長時間燃焼の実証）及び炉工学技術（超伝導コイル、プラズマ対向機器製作、遮蔽、加熱・電流駆動、トリチウム取扱、遠隔保守技術等の統合技術）の確立を目指している。しかし、Fig.5 から読み取れるように、ITER で実現できる照射場は 3dpa 程度までであり、DEMO に必要な第一壁候補構造材料の開発及びその材料が核融合炉環境下で中性子照射に耐えることを確認し、その特性データを取得することは必須の課題である。

IFMIF では、主に DEMO に使用する第 1 壁材料の照射挙動と設計データベースの取得が行われるほか、核分裂炉等の照射データとの相関の確立や、商用炉に向けた先進材料の開発の端緒を開く役割を担う。また、トリチウム増殖材や絶縁材等のその場試験も重要な試験項目である。

照射体積の有効利用のため、また、試験片になるべく一様な照射損傷を導入するために、微小試験片技術を積極的に活用するとともに、照射中に試験片内に生じる温度差を 10℃以下に制御する

ことが求められる。特に、場所による中性子強度の変動を抑えるため、その勾配を試験片サイズ程度の範囲で 10%以内とすることが要求される。

現在の運転計画では、当初の 3 年間、1/2 定格で運転し、以後 20 年間以上にわたり定格運転を行う。定常運転時、加速器はターゲットやテストセルの状態や照射条件を保持するため、一時ビーム停止があっても、1-2 分以内での再起動が求められる。ターゲット系は、12 時間以内の起動/74 時間以内の停止が要求される。長期休止時は、崩壊熱除去のため Li ループを 48 時間運転した後、アSEMBリと背面壁を交換する。全ビームの同時停止時には、照射損傷のアニーリングを避けるため直ちに照射試料の冷却が行われる。

2.2. 活動の経緯

IFMIF 活動は、OECD-IEA 協力「核融合材料に関する研究開発のための実施協定」の付属書 II「核融合材料の照射損傷に関する実験」下で、日本、欧州、米国、ロシアが参加して実施しており、これまで、1995 年～1999 年に概念設計関連の活動 (Conceptual Design Activity [7]、Conceptual Design Evaluation [8]) を、2000 年～現在までは要素技術開発関連の活動 (Key Element Technology Phase [9]、Transition Phase) を行ってきた。ところで、IEA 材料実施協定が開始される契機となったのは、Table 1 にある FMIT 計画 (Fusion Materials Irradiation Test Facility) の開発を国際協力で実施しようという

ことであり、IFMIF は、その流れを受け継いでいると言える。

要素技術開発以降の日本国内の活動形態は、原研と核融合科学研究所及び大学が連携協力して実施する形をとっており、今後の国内連携協力体制の基盤を構築できたと考えているが、現状では、大学からの寄与は加速器以外の分野が主となっている。次段階の活動としては、建設判断に資することができるレベルの設計を目指す工学実証・工学設計活動 (EVEDA) を開始することを計画しており、EVEDA の実施枠組みを国際パートナーと検討中である。

2.3. IFMIF のシステム構成

IFMIF のシステム構成は、IFMIF の目標である中性子強度とその安定度をできるだけ早期に達成するため、原理実証済みという意味で既存の技術の延長にあって、長期間の開発期間を要しないものを基本とする。また、要求される性能仕様に対して、適切な中間目標を設定して段階的に開発を進めることができるようなものが望ましい。また、最終的にもっとも重視されるのはノンストップ連続運転を可能とする安定性・稼働率の達成が見通せるシステムとすることである。

IFMIF のシステム検討にあたっては、全体を技術上ひとまとめにできるサブシステムに区分けをし、それぞれを専門のグループが担当して実施しつつ、随時、設計統合作業ですり合わせを行っている。IFMIF を構成するサブシステムは、(1) 加速器系、(2) ターゲット系、(3) テストセル系、(4) 共通部 (建屋・共通設備・中央制御) であり、Fig. 7 に (1) から (3) についての概念を示す。

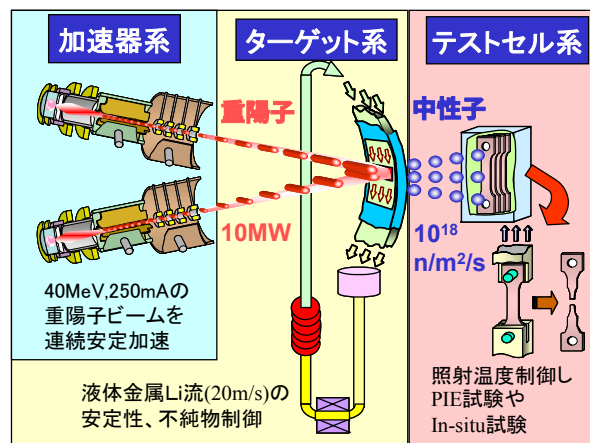


Fig. 7 IFMIF の主要サブシステム

加速器系の目標は 40MeV の重陽子 250mA (ビーム電力 10MW) をターゲットに連続的に安定して供給することであり、ターゲット系はビームを受け止め、テストセル系に 10^{18} 個/m²/秒の中性子照射場を提供する。テストセル系は材料の照射条件 (温度など) を計測制御し、照射後試験 (PIE) やその場 (in-situ) 試験データを取得する。

照射場の強度と体積に関する要件を同時に満たすには、ビームを 20cm×5cm の一様分布に拡大することが求められる。ビーム形状を要求どおりに整形するには、エミッタンスを一定以下に抑えること、また、ハロー成分を最小限にしておくことが重要である。後で幾度か参照することになる設計諸元を末尾に (Table A1) 付しておく。

Fig. 8 は各サブシステムの空間的配置がわかる断面図である。加速器室の床面をグラウンドレベルとすると、加速器系の全てと中性子照射試験室 (TEST CELL) は1階に配置され、ターゲット系の循環ループは地下に、テストセル系のホットラボ等は2階部分に配置される。

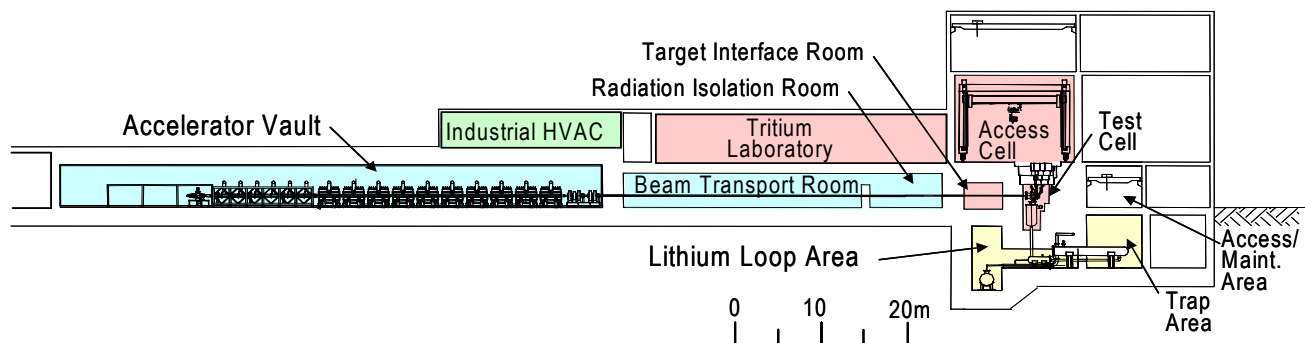


Fig. 8 IFMIF 主要サブシステムの配置

以下、各サブシステムの概念をCDR[6]に沿って解説していく。

2.3.1. 加速器系

加速器は2台の加速ユニット（1台で125mA）により駆動され、合計で250mAの重陽子ビームを40MeVまで加速する。Fig.9に加速器全体のレイアウトを、Fig.10に125mA加速ユニットを示す。各加速ユニットは入射器、175MHzの高周波四重極加速器（RFQ）、同じく175MHzのドリフトチューブ型線形加速器（DTL）、高エネルギービーム輸送系（HEBT）および高周波電力システムから構成される。入射器では、95keV/140mAの重陽子ビームが引出され、RFQにより5MeVまで加速される。さらにDTLで40MeVまで追加速され、HEBTによりLiターゲットへ導かれる。

この加速器の特徴は、各加速器モジュールで125mA以上大電流を連続動作（CW）で長期間の安定に加速することであり、長寿命化を目指した入射器開発やRFQおよびDTLを駆動する1MW級出力RF源の高信頼性が要求される。そのため、入射器では、1000時間以上の長寿命化を目指し、マイ

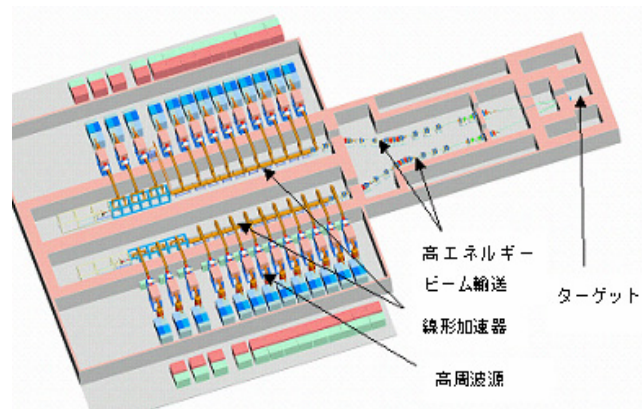


Fig. 9 IFMIF 加速器系レイアウト

クロ波を用いた電子サイクロトロン加熱によるプラズマ生成を行いイオンビームの引出し実験を行った結果、 H^+ イオン95keV-96mAの744時間連続運転を実証し、 D^+ 入射器方式としてECR型イオン源の採用を決定した。

RF源の高信頼性化に関しては、200MHz、1MW-CWのダイアクロードにより、1000時間の連続運転を実証し、稼働率98.7%を達成した。今後、周波数を200MHzから175MHzへ変更する必要があるが、高周波源として、ダイアクロードを採用する見通しが得られた。

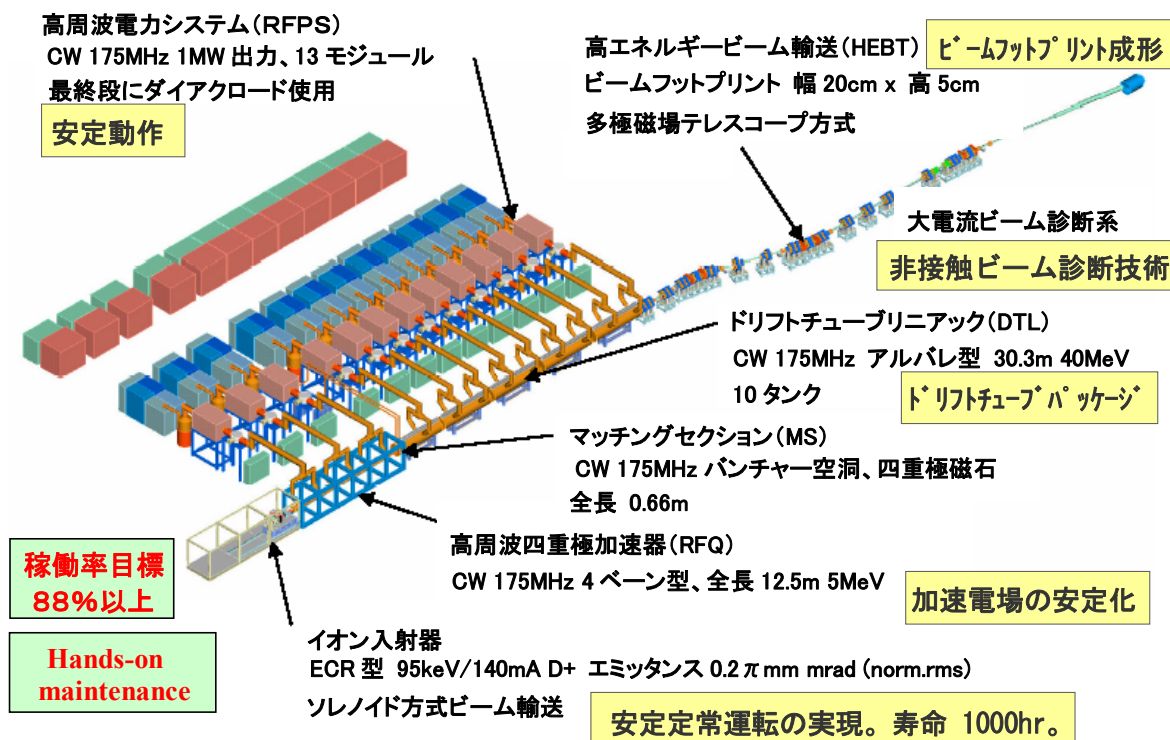


Fig. 10 IFMIF 加速器系 125mA 加速ユニット

その他の要素技術を含む、各要素技術開発の詳細は3章で詳しく述べる。

2.3.2. ターゲット系

ターゲット系の主な機能は、1年で20 dpa の中性子照射を実現するため、また10MW のビーム入熱を除去するために、最大流速20m/s で長時間安定な液体リチウム(Li)流を実現することである。

ターゲット系は、Fig. 11 に示すように、ターゲットアセンブリ、Li ループ、Li 純化系などから構成されている。

ターゲットアセンブリは、整流器、2 段絞りノズル、背面壁等から構成されている。ターゲットアセンブリと Li ループの材料はステンレス鋼であるが、照射損傷の大きい背面壁のみ、核融合炉構造材候補である低放射化フェライト鋼を選択する可能性が高い。2 段絞りノズルは、開口部が

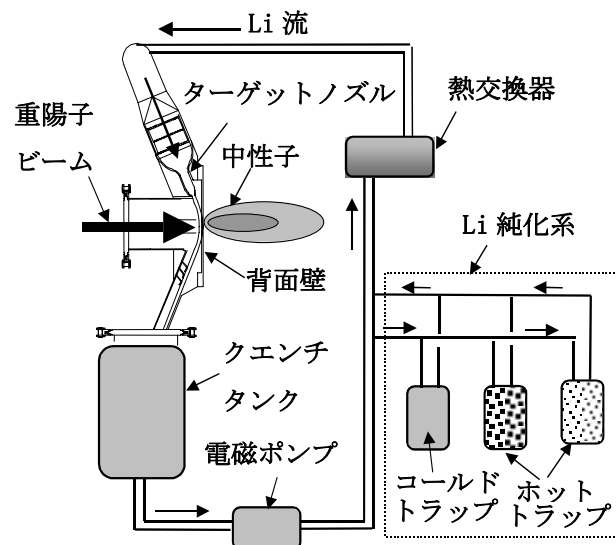


Fig. 11 IFMIF ターゲット系概念図

幅26 cm、高さ2.5 cm であり、水実験および Li ループ実験で安定流動を確認できている。

Li ループ構造については、ループ配管の熱応力解析を基に過大な熱応力が発生しない構造配置とした。ビームトリップ時にもループを安全に動作し続けることが求められるため、入熱遮断時の過渡解析を実施し、Li 固化防止に必要な有機冷媒1 次冷却系および水冷却系の運転制御法を定めた。

Li 純化系では、材料の腐食に影響する Li 中の窒素不純物制御用として、Cr および V-Ti 合金のホットトラップ、トリチウム制御用のイットリウムホットトラップの性能仕様を定める試験を実施した。放射化したターゲットアセンブリの遠隔操作交換の基本構造を定め、検証試験を行った。

2.3.3. テストセル系

使用条件が異なるそれぞれの核融合炉材料に適切な照射環境を提供するには、温度とフルエンスのような重要な照射パラメータを材料によって変える必要がある。そのため、Fig. 12 に示すように、3 種類の照射用の装置、(1) PIE 用垂直型テストアセンブリ (VTA-1)、(2) in-situ 用垂直型テストアセンブリ (VTA-2)、(3) 垂直型照射チューブ (VIT) が設置されている。それぞれの装置について、照射空間形状、試料温度、試料装荷の柔軟性、計装の収納方法等に関するさまざまな要求が規定される。

VTA-1 は試料の照射部であるテストモジュールと遮蔽体プラグが一体となったものであり、第一

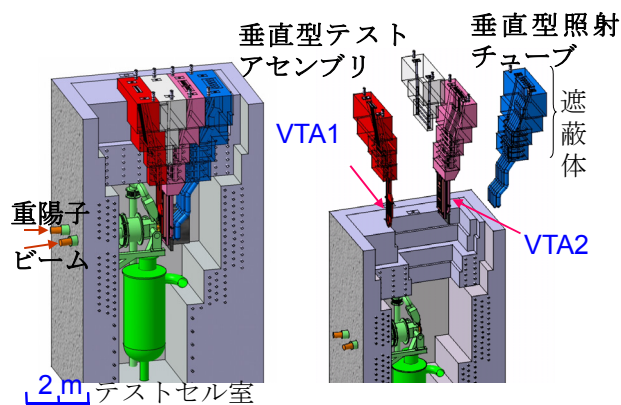


Fig. 12 IFMIF テストセル室概念図

壁構造材照射用テストモジュールとして、核特性・試料温度応答計算に基づいて Fig. 13 に示す断面形状を提案している。モジュール内の試料を収納する 12 個のリグは、それぞれ電気ヒーターを備え、それぞれ独立に試料温度を制御する。また、試料温度の推定精度を向上させるため、試料の周辺には低融点液体金属を充填する。

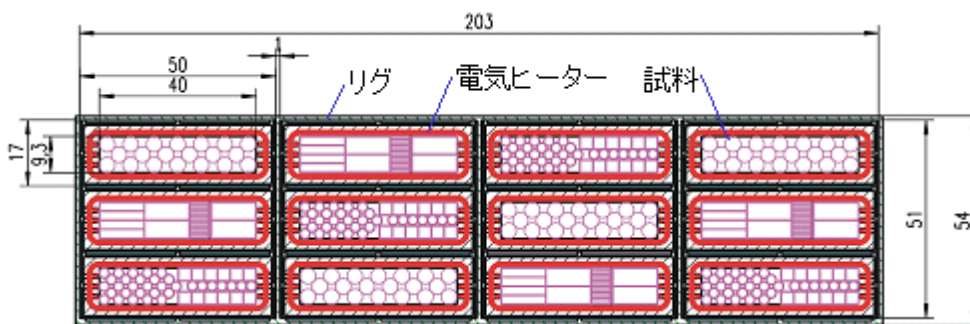


Fig. 13 垂直型テストアセンブリ (VTA-1) の試料装荷部の上断面図
(単位 mm、3 行×4 列の照射リグを個別に温度制御)

トリチウムその場放出実験などを行うテストモジュールについては、比較的低いエネルギー領域の中性子スペクトルの近似度が重要であるため、減速材／反射体を組み込むことにより、DEMO 炉相当の中性子スペクトルと気体／dpa 生成比を得るよう工夫するとともに、損傷速度 20dpa／年以上の照射体積を 0.50 以上確保することができた。

2.3.4. 建屋・共通設備

IFMIF の敷地規模は 200m x 250m で、既存の原子力関連施設内に設けることを想定する。各機器を収納する主建屋は耐震構造上、一般産業向けの加速器建屋と原子力施設向けのターゲット／テスト建屋とに区分される。リチウム漏洩時にも燃焼に至らぬよう、リチウム循環区域はアルゴン雰囲気とし、ライナー等を施す。運転中のテストセル室雰囲気の圧力は 0.1Pa に保たれる。

暖房・換気・空調系は、各区域の放射化リスクに応じて 5 領域に区分しての負圧管理とする。電

力系は 50MVA の容量を有し、非常電源も用意する。冷却水系は、加速器系に対し 27MW、ターゲット系に対し 13MW の除熱容量を有し、放射化低減のため、冷却水の電気抵抗を $1\mu\text{S}/\text{cm}^2$ 以下とする。

固体廃棄物は貯蔵の際、ターゲットアセンブリを除き減容する。液体廃棄物は中性化後、トリチウムを含む水分を蒸発（処理能力：150kg/h）で除き、固化される。気体廃棄物の処理は、透過膜

とゲッター材を用いたアルゴン排気脱トリチウム系、酸化触媒と分離膜を用いた空気排気脱トリチウム系（処理能力：20m³/h）、またはメンテナンス時の臨時脱トリチウム系（処理能力：100m³/h）にて行われる。放射線遮蔽はテストセル室周

辺に重点的に施され、最も厚い壁の厚さを 4.3m とすることで、運転中の隣接区画での作業を可能とする。

2.3.5. 中央制御・共通機器

中央制御は信頼性維持のため既存のハードウェア、ソフトウェアで構成される。中央制御と各サブシステムとの間は LAN にて接続される。中央制御と各サブシステムおよび出入管理／放射線モニターとの間のインターロックはハードワイヤーとする。

共通機器システムは、既存技術を用いた放射線監視システム、異常事象を含む運転状況を一定期間記録する映像システム、中央制御等とインターロックで結ばれる出入管理システム等から構成される。

2.4. IFMIF の技術開発課題

IFMIF の概念設計を構築するにあたっては、前述したように、既に原理実証された技術を活用することを前提としており、その限りでは、製作プロセスや性能試験に関する基礎研究の必要性はない。しかし、それらを IFMIF に応用する場合に必要な技術上の工夫・改善や適合性の向上に重点を置いた開発が必要であり、要素技術開発ではそれらを中心に実施してきた。

Table 2 に各サブシステムの主な技術課題を挙げる。Fig. 14、15 は、これまでに実施された技術開発の結果を図とダイアグラムで表現したものである。Table 2 の最下段にある項目は、IFMIF 建設判断に向けて、工学的に実証しておくべき課題であり、これら要素の性能実証に加え、詳細予備設計の実施が必要であることが概念設計の当初より認識されている。

このため、IFMIF 建設・運転実現に向けた次期フェーズとして工学実証・工学設計活動 (EVEDA) が計画されている。そこでは、建設へ円滑な移行を考慮しつつ、総合的な IFMIF プラントの最終設

Table 2 IFMIF の各サブシステムの技術課題

	加速器系	ターゲット系	テストセル系
長期間安定性の実現	・ ビームトリップの低減 ・ RF 源の安定化制御	・ 自由表面流の維持 ・ 不純物除去(腐食)	・ 試料温度制御
安全性・稼働率の向上	・ 低ビームロスの実現による機器の放射化抑制	・ Li 漏洩 ・ 生成トリチウム処理	・ 遠隔交換作業
費用対効果の改善	・ 高周波源の高効率化	・ Li インベントリ最小化	・ 照射アセンブリ構造の最適化
工学的な実証試験	・ 大電流 RFQ ・ CW-DTL 除熱	・ Li ターゲットアセンブリ ・ 純化ループ	・ 照射アセンブリ ・ 遠隔機器

計や加速器系の詳細予備設計などの工学設計、及び、これらの詳細設計に基づく原型コンポーネントの製作による製作プロセスの開発と IFMIF 運転上クリティカルとなる長時間耐久性能などの性能実証の実施に重点を置く予定である。

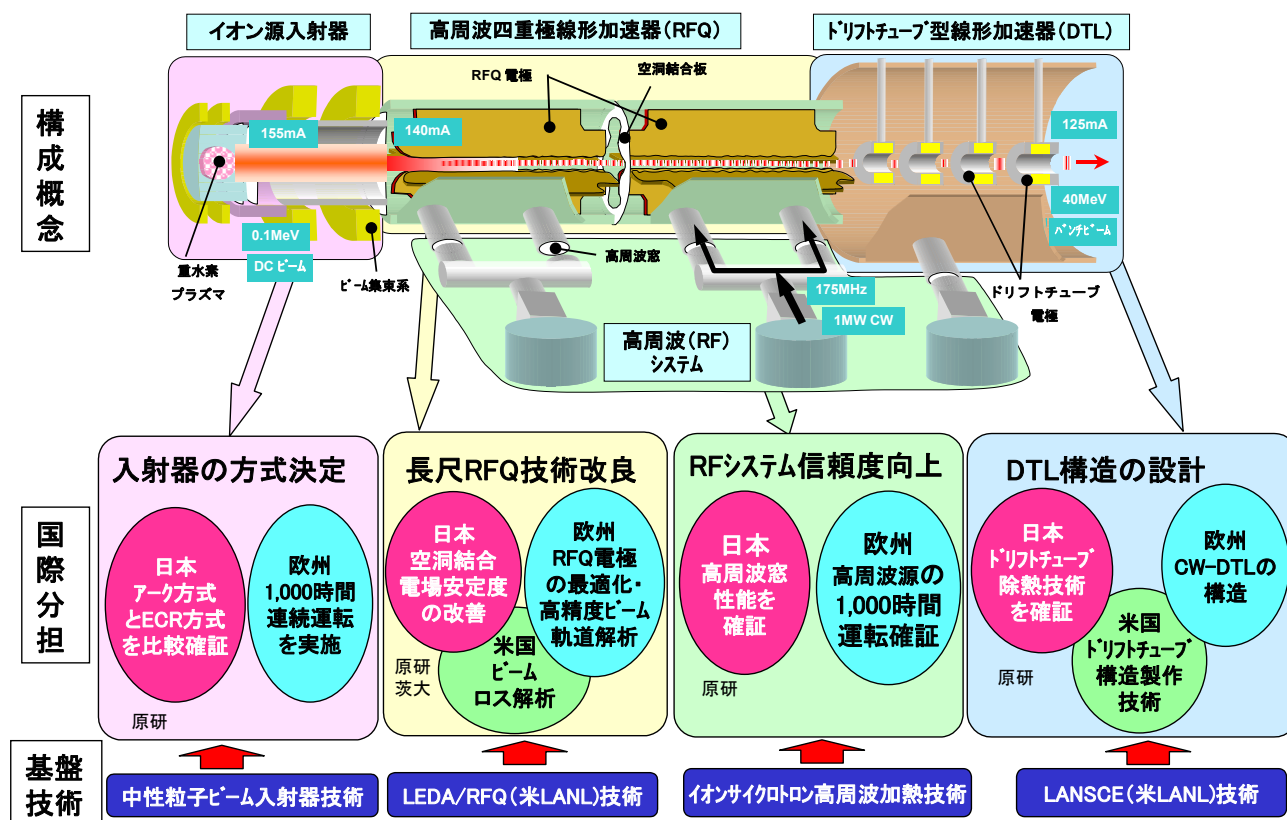


Fig. 14 IFMIF 加速器系に関する要素技術開発

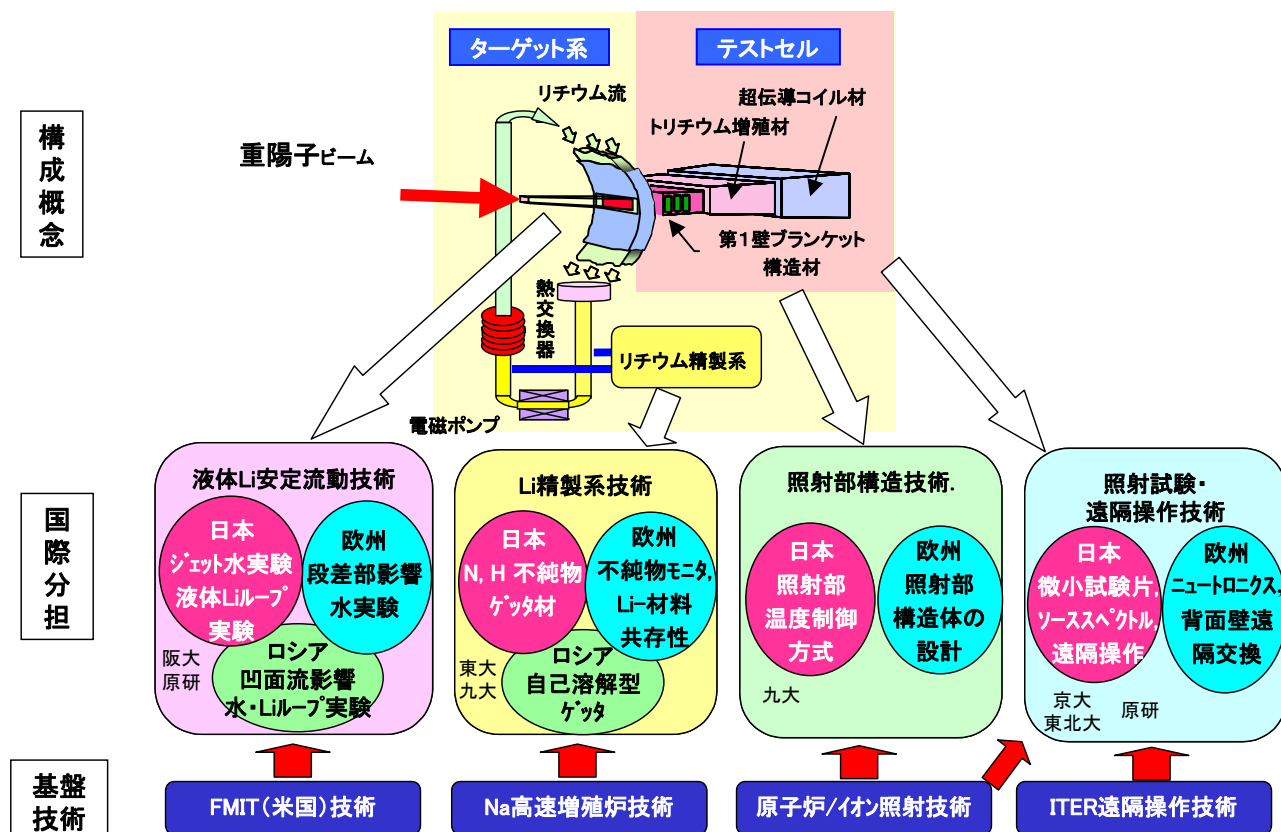


Fig. 15 IFMIF ターゲット／テストセル系に関する要素技術開発

2.5. 開発のスケジュール

工学実証・工学設計活動 (EVEDA) の実施期間は 5 年を考えているが、そのために新しい国際協力の実施枠組みが必要とされている。ひとつの考えでは、IEA の新しい協定を結び、その期間を、2 年間の余裕をみて 7 年間とするものである。一方、実機の建設・運転・廃止活動 (CODA) は、また別の協定下で実施することが想定されており、約 10 年間かけて建設から運転準備調整までを実施する一方、並行して、最後の 2～3 年は 1 台の加速器を先行して立上げ、1/2 定格運転を実施する。2 台の加速器による定格運転はその後 20 年を予定しているが、さらに 10 年間までの延長もあり得るとして設計する。

EVEDA では発注に着手できるレベルまでの工学設計に加え、各サブシステムの工学実証を実施するため、ホスト国に共同チームを、他の各国にホームチームを設けることを想定している。

一方、CODA は建設サイトに IFMIF 法人 (ILE) を発足させ、各参加国にはホームチームを設ける。建設から運転準備調整までの活動は ILE とホームチームとの間の物納 (インカインド) 方式で実施されると想定している。ILE は建設から運転へと活動内容が遷移するに従い、その組織構造を変化させる必要がある。125mA 運転、250mA 運転および廃止は ILE のみで実施する。

2.6. コスト評価

IFMIF プロジェクトコストは、EVEDA、建設、据付・検査、運転および廃止の各活動フェーズに細分化し評価した。なお、運転費には、運転準備・調整費、125mA 運転費および 250mA 運転費が含まれている。この結果、EVEDA 費は人件費などの共同チーム経費を含め約 86MCHF、建設費は約 540MCHF、据付等に 117MCHF、運転費は 250mA 定格運転時には年間約 79MCHF、廃止に約 50MCHF 必要となり、プロジェクト全体のコストは、EVEDA から施設廃止までの約 40 年間で、総額 2620MCHF のコスト規模になるものと評価された。(1 MCHF = 1 MUS\$)

3. IFMIF 加速器の要素技術

IFMIF の加速器システムは、大きく分けて、4つのセクション（入射部、加速部、輸送部、電源部）から構成される。以下、順に各セクションの概要と関連する要素技術の開発・設計の現状を解説する。構成要素の主要パラメータは末尾の一覧表（Table A1）を参照していただきたい。

一般に、設計仕様記述書には、何故、それが選択されたかについての情報はあがるが、何故、その他の案は排除されたかについては省略してしまうことが多い。そこで、ここでは、代替案についてもなるだけ言及することにする。

3.1. 入射部

入射部の範囲として、ここでは、ビームを生成し、加速に適したバンチ構造を形成するまでを含める。従って、対象とする要素としては、イオン源、低エネルギービーム輸送（LEBT）、RFQ、マッチングセクション（MS）までを含める。

3.1.1. イオン源

IFMIF 用イオン源の開発は、これまで、欧州（仏サクレ、独フランクフルト大）及び原研で実施してきており、ほぼ、要求仕様に合致する性能のものが得られている。特に、サクレのイオン源テストスタンド（Fig. 16）を用いた744時間連続運転試験では陽子ビーム120mAで稼働率95%を達成し（Fig. 17）、イオン源として総合性能に優れた ECR 型を基本設計に採用した。

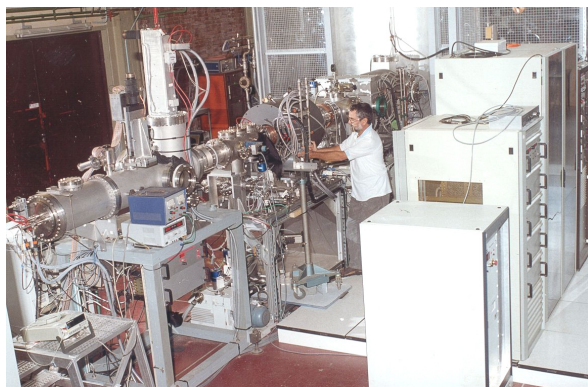


Fig. 16 仏サクレのイオン源テストスタンド

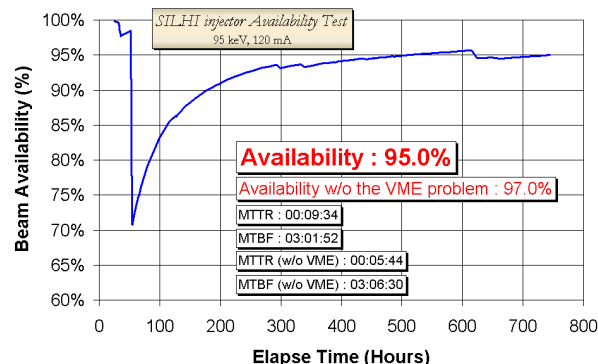


Fig. 17 ECR イオン源連続運転試験結果

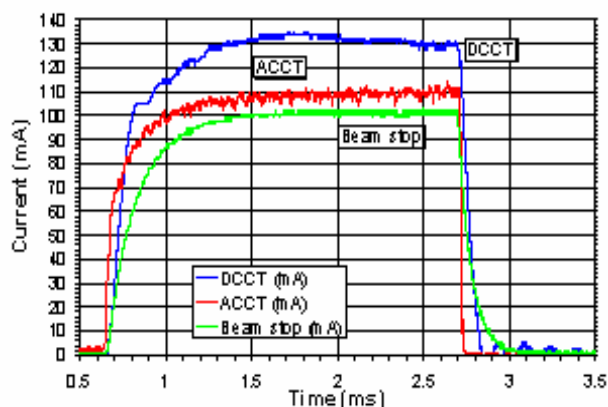


Fig. 18 ECR イオン源重陽子ビーム試験結果

重陽子ビーム引出し試験は放射化を抑えるため 2ms パルスで行われ、130mA を達成した（Fig. 18）。同じ運転条件で陽子ビームの場合より原子イオン比が 97%と高めであるとの結果が得られた。これらの一連の試験に用いた SILHI イオン源を Fig. 19 に示す。

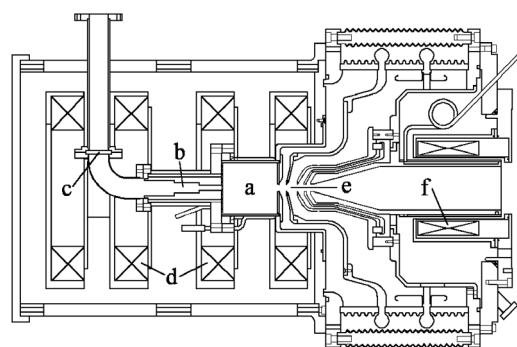


Fig. 19 SILHI ECR イオン源
(a: plasma chamber, b: ridged waveguide coupling system, c: window, d: coils, e: extraction system, f: DCTT)

イオン源の連続運転試験としては、95%稼働率は最高性能というわけではない。トリップ発生はオイルコンタミが引き金となったようで、良好な状態であったときの 160 時間試験の稼働率は 99.8%を記録している。これは 1 日に 1 回程度、放電によるトリップがあるというレベルの安定度である。また、詳しく見ると、プロトン比は 90%以上を要求しているのに対し 80~85%に留まっている。RF 電力をもう少し高め (2 割増~1.2kW) に設定すれば改善可能であるが、その場合、トリップ頻度も小さいかどうかという問題はある。

プロトン比の改善については、アーク方式イオン源を用いた試験で、Fig. 20 に示すように Xe ガスを 0.8Pa 程度加えることで電子温度が下り、低アーク電力でのプロトン比とノイズの低減に寄与するとの結果がある。ECR 源においても同様の効果を期待できるのであれば、低 RF 電力で必要なプロトン比が得られるかもしれない。

一方、 D^+ 引き出しにすると、 $D^+/D_2^+/D_3^+=96.9/3.1/0.0$ という非常によい原子比が得られた。放射線対策上、パルスモードでの試験にしたという面もあるが、常時 H+比よりよい結果を示し

た ($D^+\sim 96\%$ に対し $H^+\sim 92\%$)。

イオン源方式として、寿命を重視して ECR 方式をとるか、プラズマの静かさ (ノイズ、エミッタンスに影響) の点からアーク方式をとるのか、という問題は、原研の 60kV イオン源テストスタンドで、同一の引出し電極を用いた比較試験を行って評価したところ、Table 3 に示すような結果となり、ECR 方式を採用することになった。エミッタンスは若干劣るように見えるが、Fig. 21 に示すようにアーク方式はフィルタ磁場の方向依存性がみられるようなので、その点からも ECR 方式がよいと思われる。

Table 3 IFMIF イオン源の方式比較

	アーク方式： Multi-cusp	ECR 方式： Mirror field
ガス流量[Pa m ³ /s]	0.028	0.014-0.021
プロトン比[%]	90	92
電流[mA]	134	128
電力効率[mA/kW]	25	86
正規化 rms エミッタンス[π mm mrad]	0.27	0.36
	(引出し孔から 92cm)	

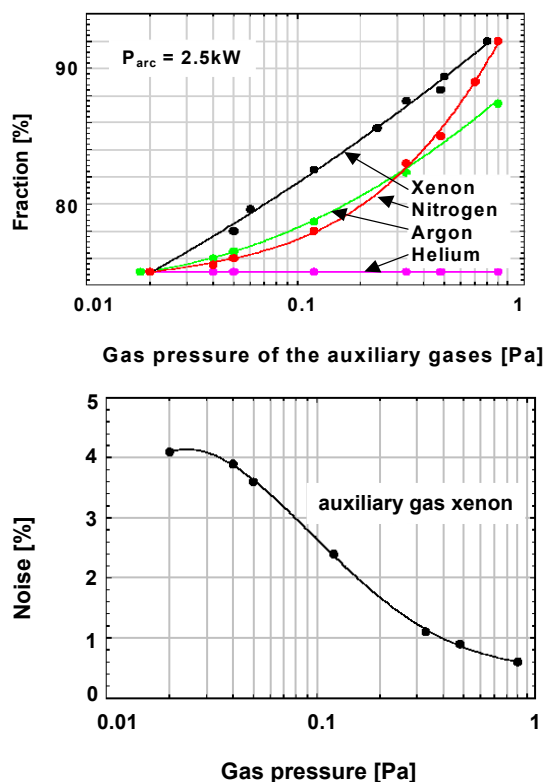


Fig. 20 低アーク電力での H 比・ノイズの改善

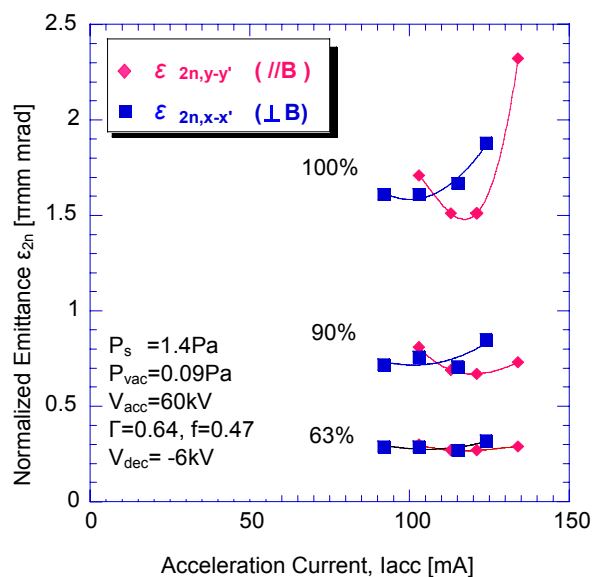


Fig. 21 アーク方式イオン源のエミッタンス：フィルタ磁場の影響

ECR 源の場合のノイズは、RF 電源 (magnetron) による 19kHz が大きい寄与を占め、電流が 80～130mA の範囲で rms ノイズが 1%以内という要求を満たしていた。また、Fig. 22 に示すように、振幅分布はガウス分布より幾分か、テール部が大きいものであった。

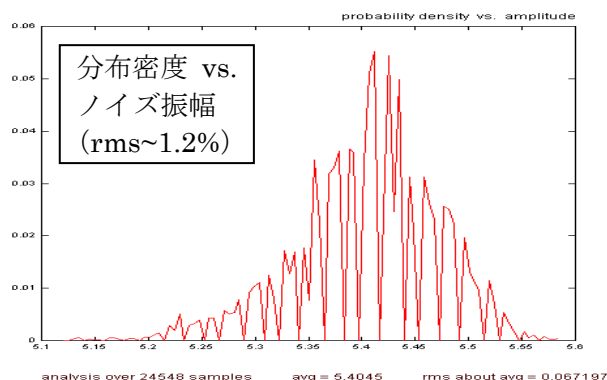


Fig. 22 ECR イオン源のノイズ振幅分布

3.1.2. LEBT

イオン源からの大電流ビーム引出しの場合、発散傾向で出てくるため、直接、RFQ に打ち込むとうまくマッチングしない。また、加速前にビーム診断を行うことで、イオン源の制御、あるいは、後段の加速において、フィードフォワードを行う際に必要な情報を取得する。

イオン源から RFQ までの低エネルギービーム輸送 (LEBT) には、空間電荷により発散傾向を持つ大電流ビームを収束する方式として、磁場収束と電場収束とが考えられる。特に前者の場合、適度に輸送ライン真空度を悪くすることで残留ガスとの衝突を起こさせ、ビームと反対の電荷の荷電粒子 (正イオンビームの場合電子) を生成させ、電荷の中和を生じさせる方式を併用することが多い。一方、こうした「電荷中和法」は現象が単純ではないため、制御し難い面があり、そういった不確かさを排除すべく電場収束を採用する事例もある。

Fig. 23 は静電収束を用いた LEBT の設計計算例であり、35mm の距離に 2 枚の静電レンズが設置されている。Fig. 24 は電流が $\pm 2\%$ 変動した場合の LEBT 通過前後の位相図計算結果である。LEBT 通

過後のエミッタンスが大きく劣化することから、140mA 重陽子ビームの収束系としては、静電方式は不適であると思われる。

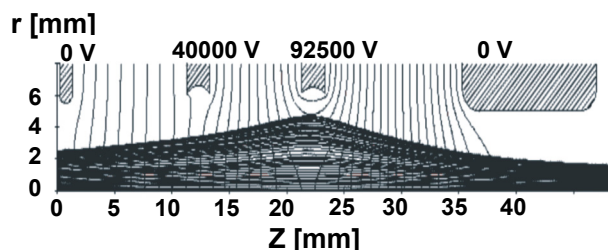


Fig.23 静電方式の LEBT

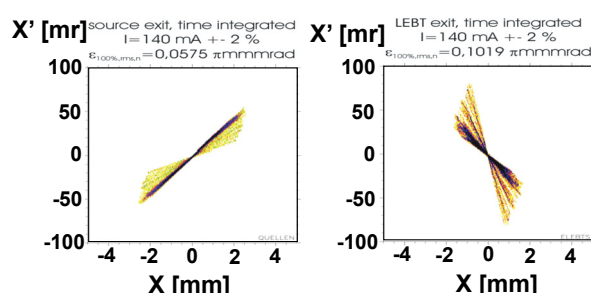


Fig.24 静電方式 LEBT を 2% の電流変動を有するビームが通過した場合の位相図

磁場収束方式は、標準的には 2 つのソレノイド磁石を配置する。その場合、両ソレノイドにはさまれる区間はビームエンベロープを概ね一定の径を保つようにできるため、ビーム診断に適したポイントとなる。Fig. 25 に Saclay のテストスタンドの事例を示す。原子イオンのみが RFQ にマッチングし、分子ビームは入口でカットされる。

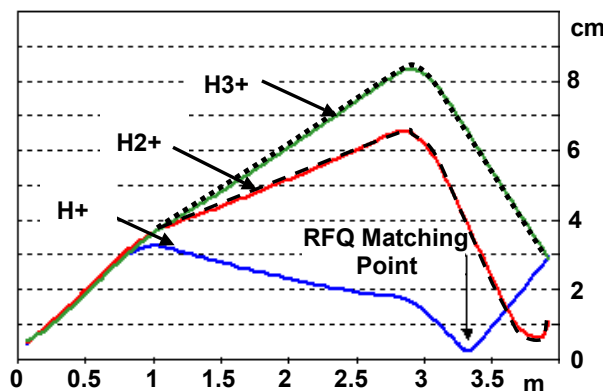


Fig.25 磁場方式 LEBT 中のビームエンベロープ

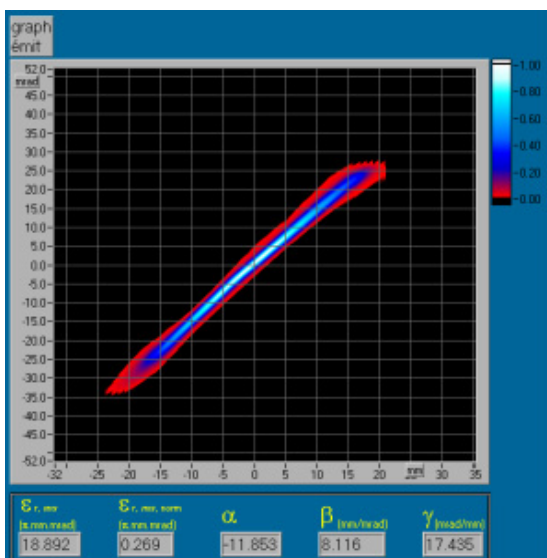
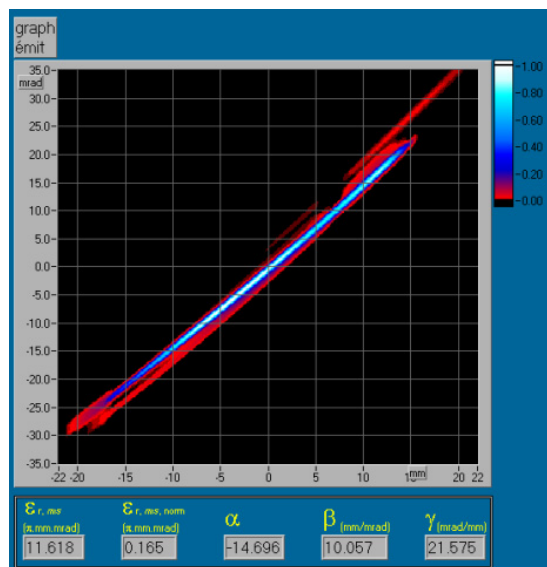


Fig.26 磁場方式 LEBT 前後のエミッタンス
(上: 入口、下: 出口)

Fig. 26 は Fig. 25 で示した LEBT の入口・出口でのエミッタンス図の比較である。入口で 99%規格化エミッタンスは $1.4\pi\text{ mm mrad}$ (95keV/ 120mA)、出口では、ソレノイド磁場強度に応じて、0.2～0.45 $\pi\text{ mm mrad}$ となる ($r-r'$ 規格化 rms)。

Fig. 27 は LEBT のイオン源に近い側 (64cm) での空間電荷中和の試験結果である。ビーム径にはほとんど依存せず、97%強が中和される。このときの残留ガスは H_2 がほとんどを占める (5mPa)。これに 7～10mPa の Ar ガスを加えると中和率は 98%を超す。

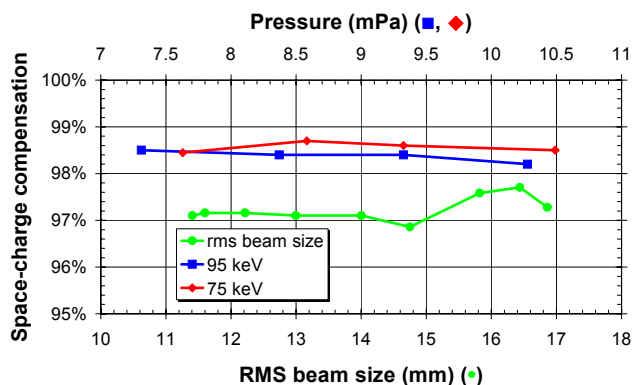


Fig.27 磁場方式 LEBT の電荷中和効果(上流側)

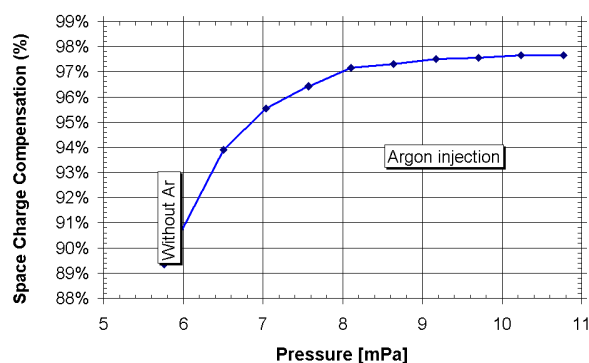


Fig.28 磁場方式 LEBT の電荷中和効果(下流側)
残留ガス圧力依存性

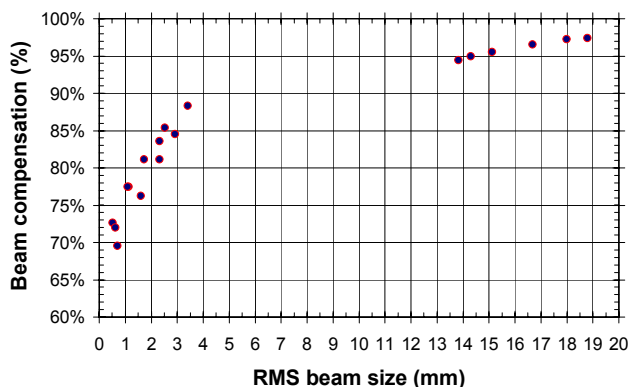


Fig.29 磁場方式 LEBT の電荷中和効果(下流側)
ビーム径依存性

更に下流 (170cm) での同様な計測では、Ar 添加により、89%から 98%に増えた (Fig. 28)。この場合、ビーム径を極端に小さくできるのでビーム径依存性が観察される (Fig. 29)。以上のことに加え、ソレノイドのオン・オフで様子が変わることから電子のミラー磁場トラップが効いているら

しいこと、周囲からの電子生成がないと期待したほどの中和率に達しないことがわかっている。

中和の速さについても測定しており、残留ガス圧に依存し 2.3~10 μ 秒程度で完了する。この測定にはイオン源の立ち上がり時間も含まれるので、20~200 kHz が応答の周波数下限とみられる。(上限はプラズマ周波数~0.5GHz)

3.1.3. RFQ

RFQ は IFMIF 加速器仕様を決定する上で、最も重要な役割を占める。元々、ロシアで発明された RFQ を、「FMIT のために 100mA 重陽子 CW 加速する」という命題を受けたロスアラモスのチームが採用したこと、今日の多様な RFQ の応用が始まったと言ってよい。

RFQ の機能は、イオン源からの連続ビームを高周波電場で徐々にバンチ形成し、次段のセクションのアクセプタンスに合致する位相空間分布に変換することである。その際、ビームの空間電荷による発散力に対抗するため高周波で交番する四重極電場を用いるという発想である。この電極の役目をはたすのがベーンもしくはロッドと呼ばれるもので、IFMIF の場合、ベーン型が基本設計として採用されている。Fig. 30 にそれぞれのモデル空洞を示す。

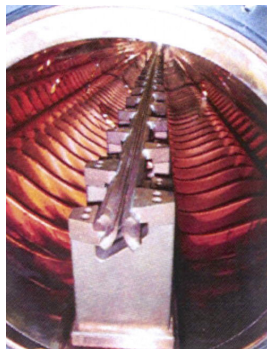
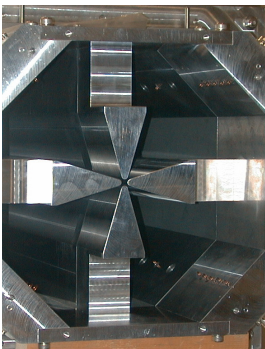


Fig. 30 IFMIF 用 RFQ モデル
(左) ベーン型、(右) ロッド型

一方、縦方向のマッチングにはビームエネルギーを増減する機能も必要であるため、電極表面に凹凸 (モジュレーション) をつけることで次の一般式で表現されるポテンシャルをビーム中心軸上に形成する。

$$U(r, \vartheta, z) = \frac{V}{2} \left[\sum_n A_{0n} r^{2n} \cos 2n \vartheta + \sum_n \sum_l A_{ln} I_{2n}(lkr) \cos 2n \vartheta \cos l k z \right] \quad (3-1)$$

$l + n = 2p + 1$ ($p=0,1,2,\dots$), V :ベーン間電圧,
 I_{2n} : $2n$ 次変形ベッセル関数, $k = 2\pi/\beta\lambda$

通常、最低次の 2 項を考慮すれば概ね有効、

$$U(r, \vartheta, z) = \frac{V}{2} \left[A_{01} r^2 \cos 2 \vartheta + A_{10} I_0(kr) \cos 2 \vartheta \cos k z \right] \quad (3-2)$$

$$A_{10} = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \quad \dots \text{Acceleration}$$

$$A_{01} = \frac{1 - A_{10} I_0(ka)}{a^2} \quad \dots \text{Focusing}$$

とされるが、大電流加速の場合、テールを含むビーム径がアパーチャ径に比べ小さいとは言えず、もう少し、きめ細かな対応が必要である。高次の項を考慮できるビームダイナミクスシミュレーション用コードとしては PARMTEQM[10] などがある。また、シミュレーションコードには独立変数として軸方向長さをとる z -コードと時間をとる t -コードがある。PARMTEQM は前者の例であり、空間電荷効果を正確に評価するには t -コードで計算すべきとの考えにより TOUTATIS [11] などが開発されてきている。

IFMIF の周波数は 175MHz が採用されているが、Table 1 でわかるようにこれまでの設計よりも高い周波数となっている。ちなみに、RFQ の発明者である Teplyakov がさる会合で示した RFQ の周波数と加速電流の対応を Fig. 31 に示す。これを見ると、どうやら、175MHz による 125mA 重陽子加速はぎりぎりの線であるらしい(キルパトリックを高くとる)。余裕をみるのであれば、低めの 150MHz などに設定するのも一案であるが、一方では、HEBT でのビーム整形を思うとエミッタンス(ビーム径)を大きくしたくないところである。周波数仕様の 175MHz は、これらを総合的に判断した結果として出てきたものである。

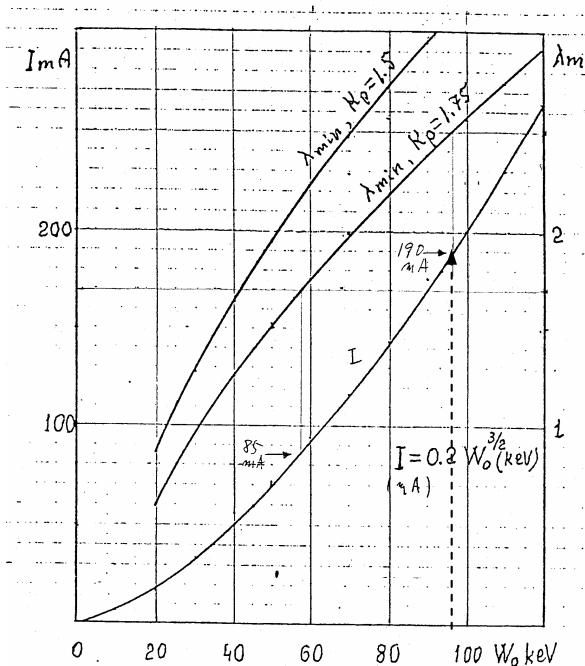


Fig. 31 RFQ による重陽子加速の目安

周波数の選択が終わると次に決める必要があるのは電界強度（キルパトリック数）である。一般に CW 大電流加速の場合、1.8 キルパトリックが上限の目安となる。その近辺の値でまずはアパーチャサイズが最小となる RFQ の前段部（Shaper）で通過率が極大となるところを探す（Fig. 32）。ここでは 5.1 を選択する。入射エネルギーも重要であるが、こちらは、イオン源の性能達成度との兼ね合いもあり、自由に選ぶことはできないが、高めのエネルギーを選ぶと通過率は向上するものの、全長が長くなっていく。

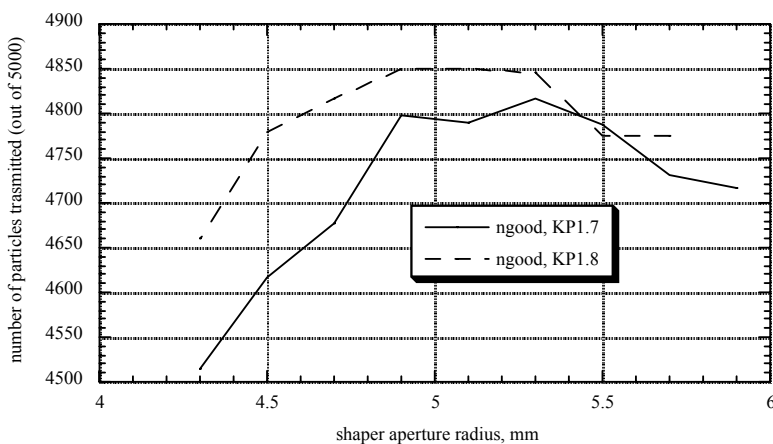


Fig. 32 RFQ-shaper 径によるビーム通過率の変化

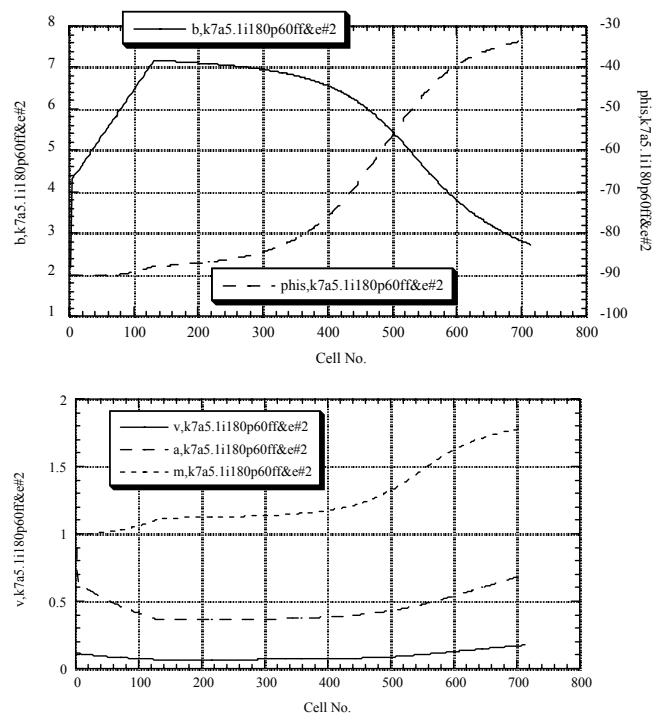


Fig. 33 RFQ パラメータの設定
(上：実線 B、破線 ϕ_s 、下：実線 V、破線 a、点線 m)

この後パラメータを順次、定めていくが、とりわけ重要なのは、収束力係数 B と同期位相 ϕ_s の設定である。Fig. 33 に示すように、B は最初の radial matching 部の低い値から shaper 部の終端の最大値に向けて増加させる。図の例は shaper 始端の値を最大の 60% としている。 ϕ_s は shaper 始端からしばらく -90 を維持し、その後 shaper 終端までに数度増やす。Shaper 以後はバンチングと加速を

組み合わせていくことになる。以前は、加速部として m を固定した領域をつくる方法がとられていたが、それは、必ずしもバランスのよいやり方ではないので、別の指導原理が模索されている。Equi-partitioning に基づく方法もそのひとつである。その場合、

$$\frac{\varepsilon_{ln}}{\varepsilon_{tn}} = \gamma \frac{Z_{rms}}{R_{rms}} = \frac{\sigma^t}{\sigma^l} = 2 \quad (3-3)$$

を満足するように決めていく。 ε_{ln} 、

ε_m はそれぞれ、縦方向、横方向の規格化エミッタンス、 Z_{rms} 、 R_{rms} は縦方向、横方向ビームサイズ、 σ^l 、 σ^t は縦方向、横方向 phase advance を表す。

RFQ 主部の ϕ_s は縦方向ビームサイズと RF バケットの左端との比を一定に保持するようにするという Teplyakov/Kapchinsky の方法をとる。縦横のビームサイズに対するアパーチャ係数を Fig. 34 に示す。RFQ ビームダイナミクスのシミュレーション結果を Fig. 35～36 に示す。

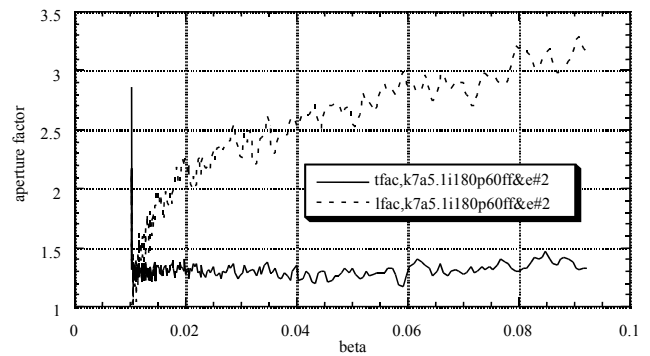


Fig. 34 RFQ の横方向・縦方向のアパーチャ係数

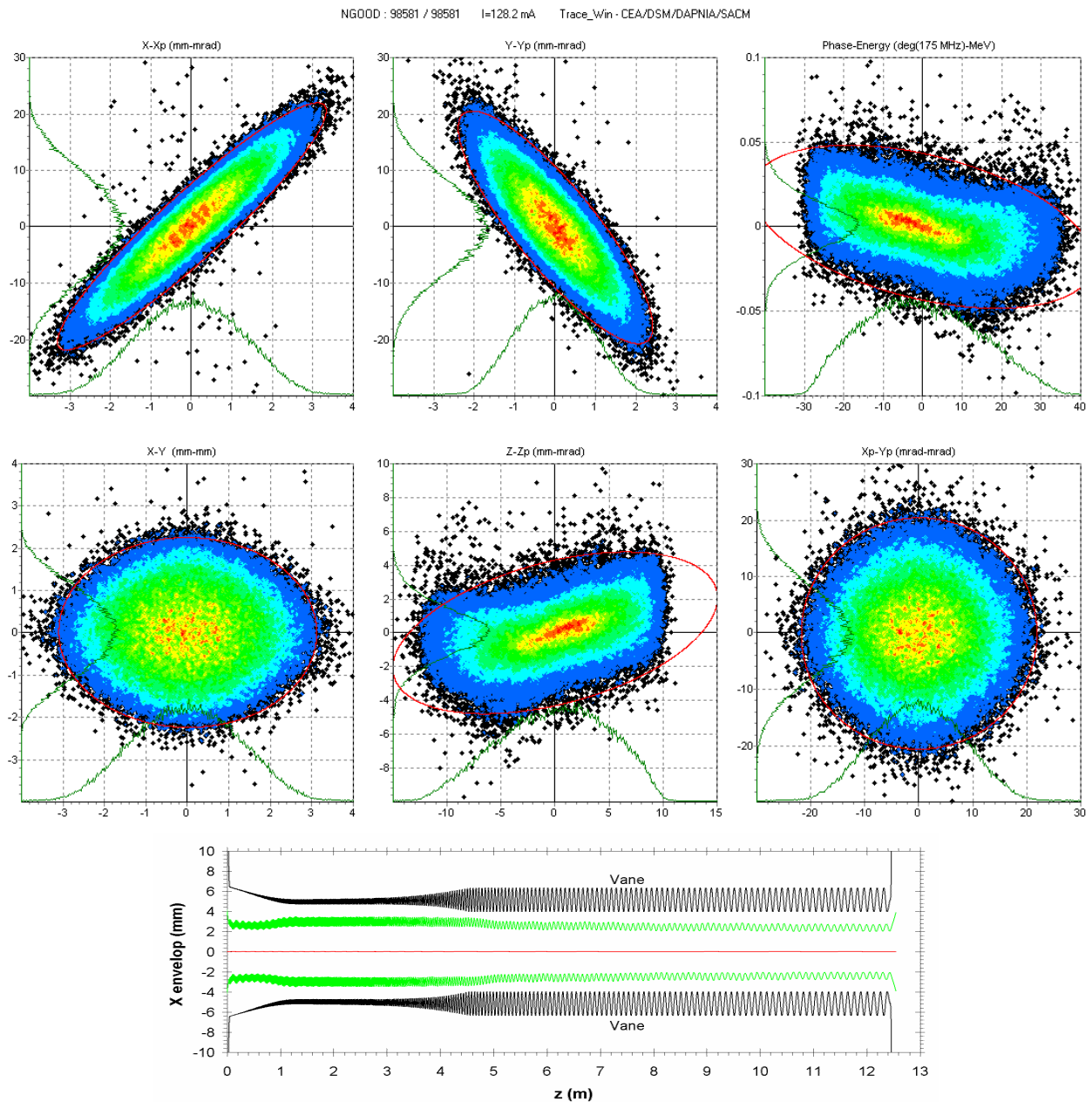
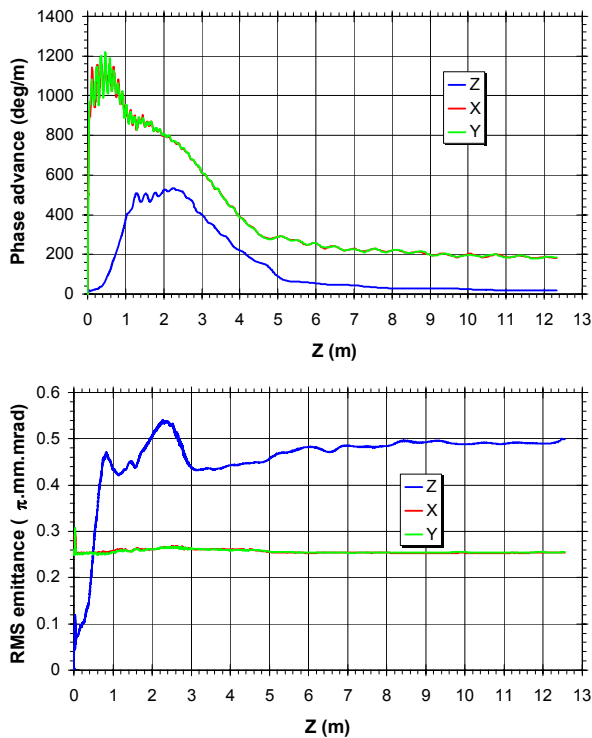
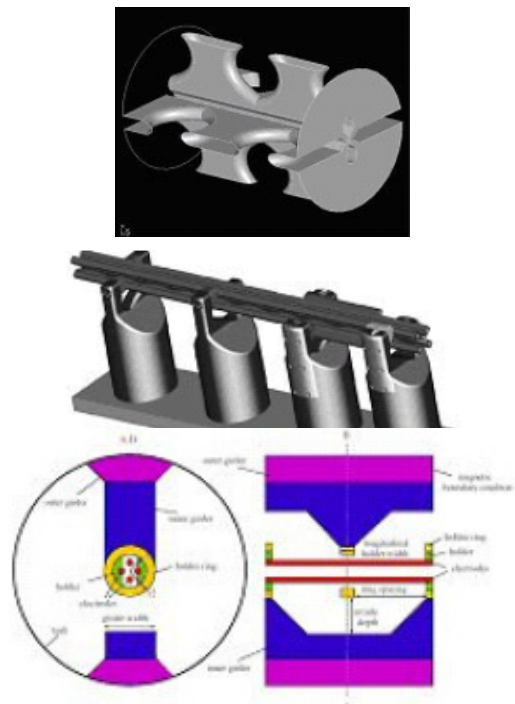


Fig. 35 RFQ のビームダイナミクスシミュレーション結果
(上：位相空間分布m下：x 方向エンベロップ)



**Fig. 36 RFQ のビームダイナミクス
シミュレーション結果
(上 : phase advance、下 : エミッタンス)**

基本案である 4-vane RFQ の代替案 (Alternatives) として検討の対象となるのは (1)split coaxial、(2)4-rod、(3)IH である。Table 4 に特性を比較したものを、Fig. 37 にそれぞれの電極部構造の概念図を示す。



**Fig. 37 RFQ の代替案 (上 : Split coaxial、
中 : 4-rod、下 : IH)**

ビームダイナミクスの検討から、IFMIF 用の 5 MeV-RFQ は全長 12.5m 程度になるため、高次モードの影響を小さくできる Resonant Coupled 方式 [14] が採用されている。モード分離の測定結果 (Fig. 38) から、全体を 3 分割、RF セグメント長を 4m 強とした。

Table 4 IFMIF 用 RFQ の方式比較 [13]

	Split Coaxial	4-rod	IH	4-vane
Q	13985	631	9362	17901
E_0 (MV/m)	17.73	20.0	19.34	17.41
B_0 (T)	0.0048	0.034	0.0126	0.0074
P_{Loss} (kW)	49.2	80.4	77.8	37.46
P_{Loss} (W/m ²) peak	1.75	91.48	10.71	4.34
Shunt impedance	High	-	Good	-
Tuning possibility	Good	-	Good	-
Field characteristics	No dipole	-	High field sym	-
Mechanical stab.	High	-	High	-
Cost	-	Low	-	-

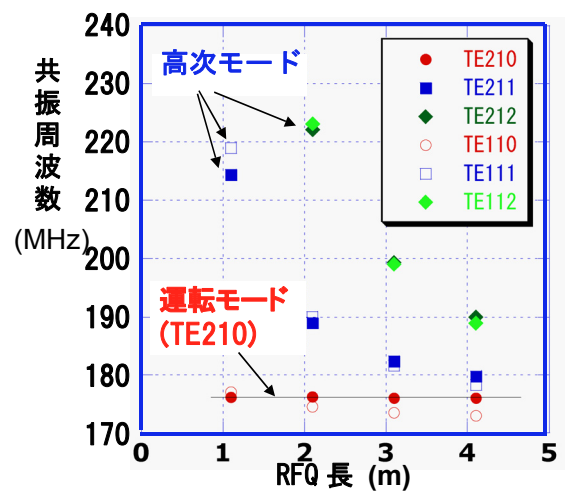


Fig. 38 RFQ 長による高次モードの接近

これまでの技術開発では、175MHz の空洞はモジュレーションのないコールドモデルまでであり、より工学的なモデルは陽子用の 350MHz 空洞に留まっている。Fig. 39 に、そのベーン部、エンドプレート部、スラグチューナの位置がわかる正面図を示す。チューニングは、これらの固定チューナと冷却水温度制御による方法の併用を想定している。接合方法は銅ろう接を採用する。

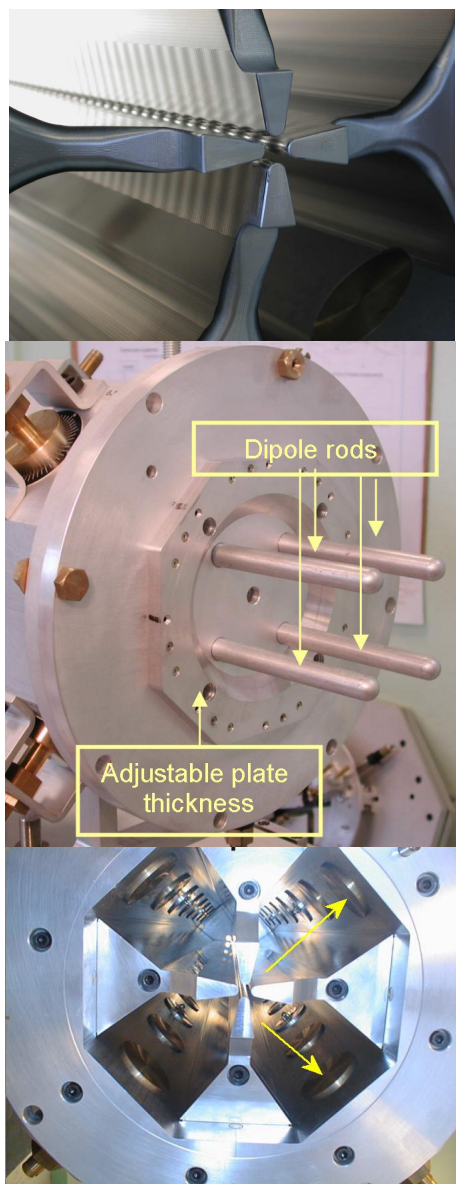


Fig. 39 RFQ モデル (陽子用 350MHz)
(上：ベーン部、中：端板部、
下：正面 (矢印はチューナ))

IFMIF-RFQ の製作時の誤差 (セル毎にランダムに寸法が変動するとして) がビームに及ぼす影響を評価した結果、Fig. 40 に示すように、50~60 μm 以内であれば、大きな影響はないとの結論を得た。

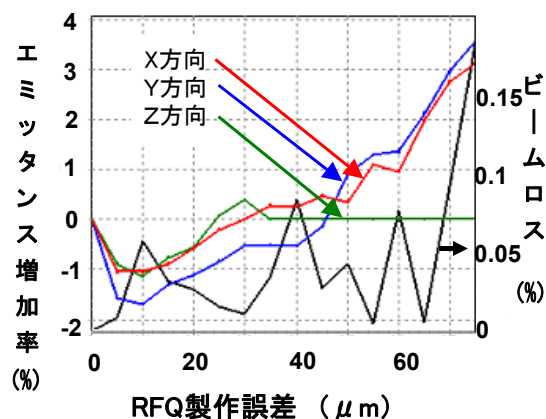


Fig. 40 RFQ の製作誤差がビーム特性に及ぼす影響

3.1.4. MS

RFQ から DTL へのビームの受け渡しに際しては RFQ への入射とはまた別の意味でマッチングに中止する必要がある。高周波電場による収束から、DT 内 Q 磁石による磁場収束へと移行するため、マッチングセクション (MS) には、FDF (D) の収束 (50~70T/m) を組み込む (最後の D は DTL の第 1DT)。加えて縦方向についても拡がりを抑えるため 2ヶ所バンチャー (150~160kV) を導入する。Fig. 41 はエンベロップ計算による検討例であり全長 75cm となっている。

設計のやり方によっては、RFQ の出口部のセル及び第 1 DTL の最初の DT を組み合わせることで、MS に相当する機能を実現するという考え (IFMIF-CDA) もあるが、諸々の変動要因に対してより柔軟な対応ができるよう、最近、MS として追加するようになった。

RFQ から DTL へのつなぎ方については、CDA のごく初期の段階で、Funneling を用いる設計も比較検討された。RFQ まで 2 系統とし、DTL を 350MHz として 250mA 加速させるという案である。これについては、技術的に必ずしも確立したものではな

いこと、また、ビームトリップ時の照射試験側の対応を考慮すると、2 ビームを独立にターゲットまで持ち込むことのメリットがあること（片方が停止しても継続照射可能となる）から、その後、検討対象から外れた。

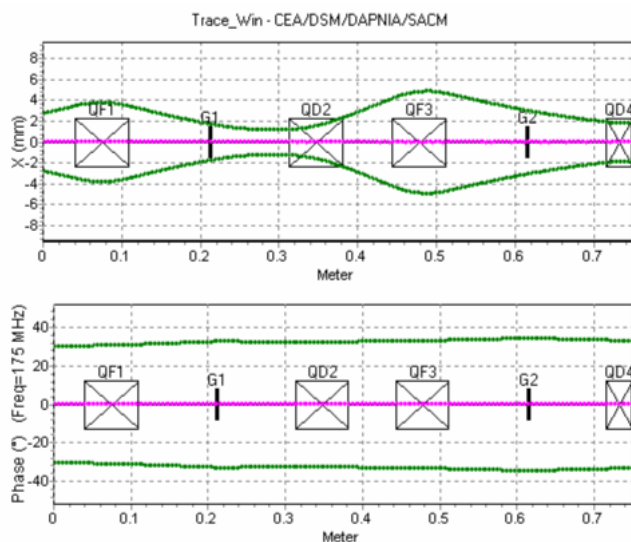


Fig. 41 マッチングセクションの設計事例
(上：x 方向エンベロップ、下：バンチサイズ)

3.2. 加速部

IFMIF の主加速部は基本仕様がアルバレ型 DTL であり、代替案として、超伝導リニアックを考えている。175MHz の DTL 自体はコンベンショナルな技術といってよいが、100mA を超す CW ビームを長期間安定に運転した事例はないため、特に、各部の除熱の問題、発熱に伴う変形やデチューンの影響、冷却水温度制御によるチューニングの実証など工学的に解決すべき課題は多い。

3.2.1. DTL

重陽子ビームを加速するということから、とにかくビームロスをもっと抑制したいというのが最大の目標である。20～30 年間の連続運転を経て、なおハンズオンで保守可能な状態に保つものとする、要求されるビームロスはいくつかの nA/m 以下となる。もう少し、現実的な保守手順を想定したとしても 50nA/m 以下にはしたい。DTL のビームダ

イナミクスシミュレーションにおいては、まずこのことが最初に検討される。

ピーク電界を 1.3Kp、ボア径 2.5cm とした設計例では、DTL 全長は 30m 程度となる。最初のタンクのみ Ramped Gradient 型とし、残りは定勾配型とする。DTL のタンキングは、IFMIF-CDA の当初、30 及び 35MeV（または、32 及び 36MeV）のビームも提供できるようにとの要求があったときには、最後の 1～2 タンクのセル数を少なくする設計も存在したが、現在の仕様は 40MeV のみでよいということなので、RF 源の電力配分が適切になるように決めることでよい。空洞の銅損が 2MW 程度であるので、ビーム電力 4.4MW と合わせて 6.2MW を 10 分割する案が標準となっている。Table A1 に設計例を載せてある。各セルにおける同期位相角を Fig. 42 に、規格化エミッタンスを Fig. 43、phase advance を Fig. 44 にそれぞれ示す。各 DTL タンクの間に追加の収束要素は考えておらず、両終端部のハーフセルで調整するような設計思想である。

理想条件での解析結果はビームロスゼロが実現できているが、各種誤差要因が入ってくると、ビームにテール部が生じ、ロスの原因となることが懸念される。そこで、RFQ を含めた全系について誤差のビームロスへの影響を調べたのが Fig. 45 である。RFQ 後段から DTL 初段にかけて 10^{-6} レベルでのロスが見られる。

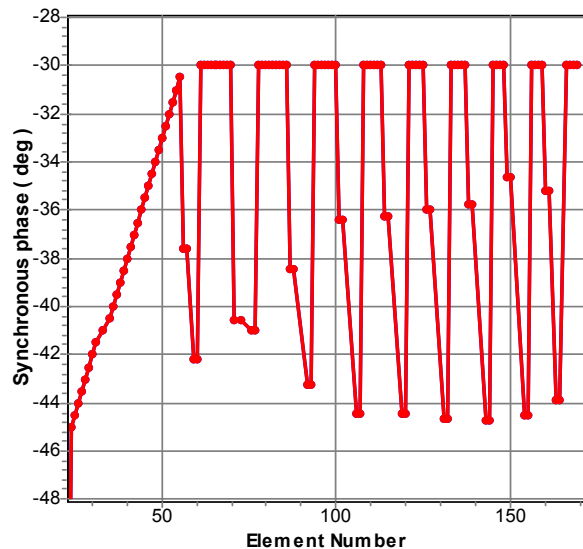


Fig. 42 DTL の各セルにおける同期位相

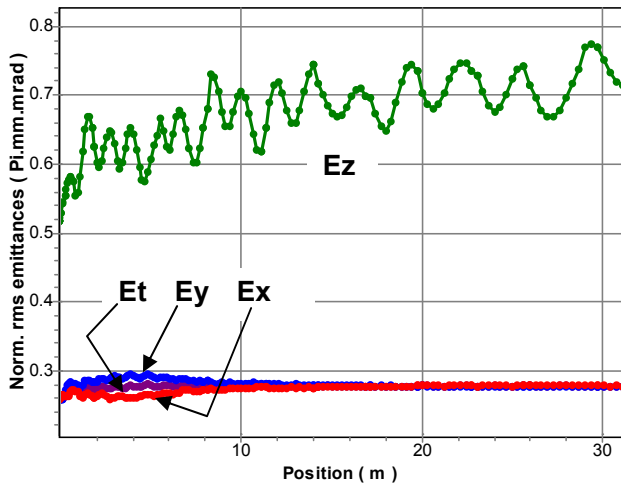


Fig. 43 DTL の各位置におけるエミッタンス

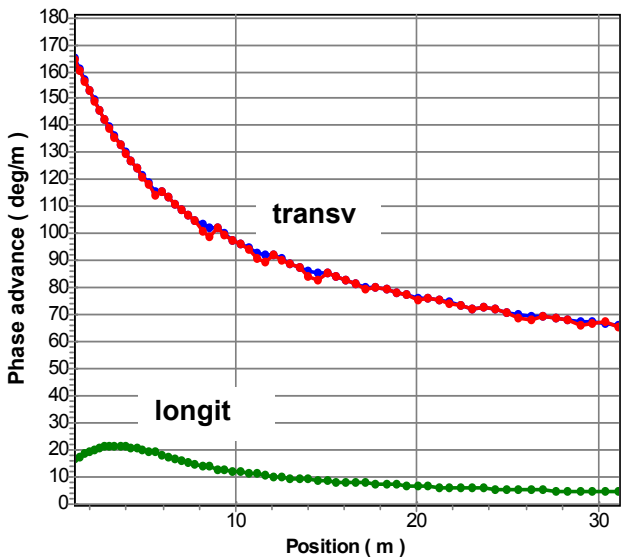
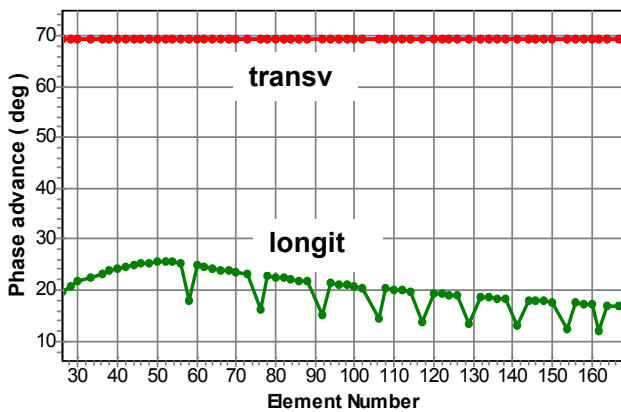


Fig. 44 DTL の各位置における phase advance
(上：ゼロ電流、下：フル電流)

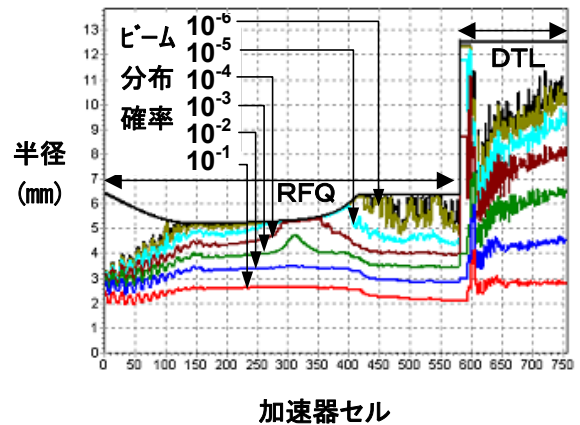


Fig. 45 RFQ-DTL の各位置における
ビームロス評価

DTL の熱設計のうち、最も厳しい条件となるのは最初の DT の伝熱のチョークとなることである。Fig. 46 に第 1DT と第 117DT の構造断面を示す。第 1DT の表面温度分布を Fig. 47 に示す。最大温度が 22.7℃に抑えられており、十分な冷却能力を備えた設計と考えられる。

製作性の検証は Fig. 48, 49 に示すように陽子用 350MHz の開発プロジェクトと併せて進められたため、175MHz での実証は今後の課題となるが、基本的に製作上の困難は見つかっていない。RF 電力試験で所定の性能を実現していることを確かめることが今後求められる。

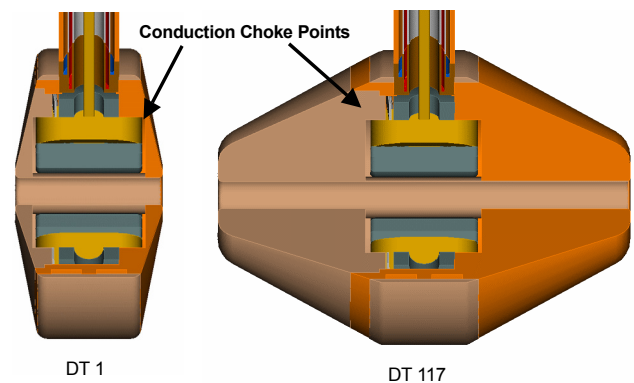


Fig. 46 DT の構造断面図

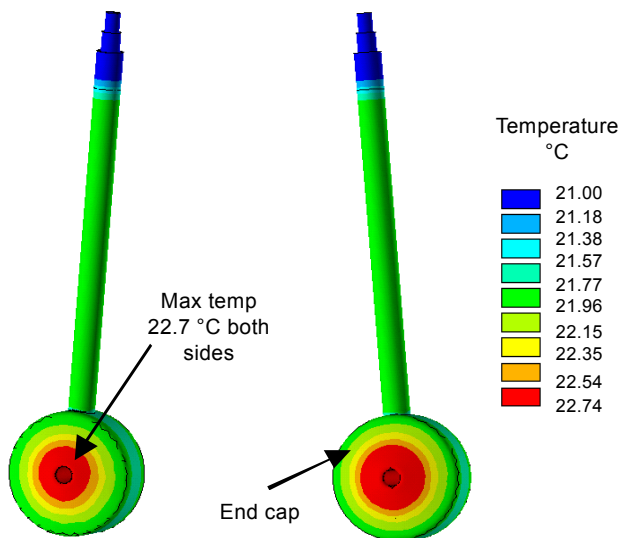


Fig. 47 第 1DT の表面温度分布



Fig. 48 第 1DT(陽子用 350MHz)の冷却構造
(左 : flood flow 方式、右 : ホローコンダクタ)

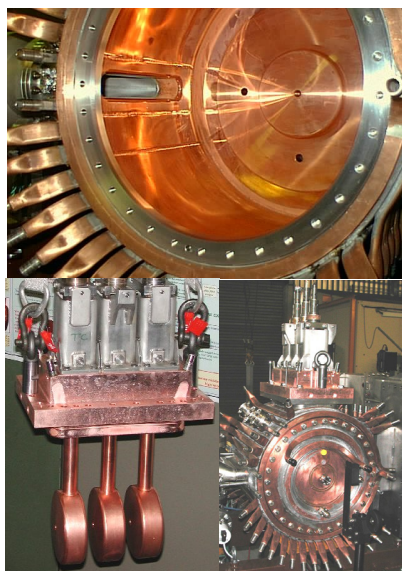


Fig. 49 DTL ホットモデル(陽子用 350MHz)
(上 : タンク内面、下左 : ガーダに取付けた DT、
下右 : タンク外観)

3.2.2. SCL

DTL の代替案として有力とされているのが超伝導リニアック (SCL) である。但し、IFMIF は 40MeV で加速が終わるので、高エネルギー加速器における必要性とはまた別の意味での長所を期待している。ひとつは、常伝導のようにビームポア径を小さくして効率を上げるという必要がないため、十分なアパーチャ係数をとった設計とすることができることである。また、超伝導状態を保つ低温で動作させるため、温度変動に起因する擾乱が低減することである。

従って、十分な原理実証がなされ、工学的に利用可能なレベルまで開発が進んだときには、SCL を採用することに問題はないと考える。しかし、IFMIF 用として大掛かりな技術開発を行うというスコープはないため、今、直ちにどちらかを選択するという場合にはどうしても 2 番手となるのが実状である。

これまでに検討されてきた SCL のタイプとしては、スポーク型、半波長型、四分の 1 波長型、H 型と多様である。初めの 3 者はどちらかというと言単一空洞タイプであり、従って、個々の空洞に比較的小さな RF 電源をつないで動作させることになる。このことは、RF コストという観点からは割高となる要因であり、そのため、コスト的には常伝導方式と変わらないかむしろ高めとなってしまふのが難点である。その点では、H 型 (正しくは CH, Crossbar H_{210} モード) は Fig. 50 に見られるような一体タンク構造であり、DTL と同様の 1 MW-RF 源を利用できる。現在、超伝導モデル空洞の製作まで終わりクライオスタットでの性能試験に入るところであり今後の動向を観察したい。

これまでの SCL の難点のひとつは、入口エネルギー (β) の下限があり、175MHz の場合、8~10MeV であることである。従って、5MeV-RFQ との間をつなぐ (常伝導) 加速器が必要である。ここをアルバレ型 DTL にするか、IH 型とするか、興味は尽きないが、IFMIF 本来の目的である長期間安定動作の実現という精神からは幾分離れていくように思われる。低 β から使用できる大電流 SCL の出

現（実証）があって初めて採用の可否を問う段階に至るのではないだろうか。



Fig. 50 350MHz CH-DTL モデル

3.3. 輸送部

高エネルギービーム輸送（HEBT）における技術的課題としては、どうやって、できるだけ小数の要素を組合せてターゲット上に要求されるビーム分布（20cm×5cm）を実現するかという点にある。Fig. 51 に設計案を示す。DTL からのビームは一旦、アクロマチックベンド（図中 20° Achromats）を通過し、最終ベンド（図中 9° Achromat）へと導く。角度を 9° としたのは、

- （1） 中性子照射場の強度・体積を最大化するには、なるべく浅い角度がよい。
- （2） ターゲットから逆流してくる中性子をなるべく上流に戻さないよう、ターゲットを

見込むビームラインの角度は深くする。という双方の妥協点として得られたものである。最終ベンドより下流は大量の逆流した中性子を浴びるため、高い放射化レベルとなり、遠隔保守が必要となると予想される。従って、その部分のビームライン要素をできるだけ無くした設計が望ましい。

図中 High Order Elements とあるのが多極磁場を用いたビーム分布整形システムである。基本的には八重極磁石のもつ 3 次の磁場依存性を利用して引き伸ばしたビームの両すそを折り畳んで平滑化するという原理である。単純に考えても、1 方向では上手く行くだろうが、2 方向を同時に平坦にするのは容易ではないように思える。実際に、計算してみると確かにそのような傾向が見られる。実際には、高さ方向のビーム密度分布は必ずしも平坦であることが必須ではなく、照射場の要件からはむしろ、中央部がへこんだ形がよいのかもしれない。従って、ビーム整形システムとしては静磁場による方式とラスタースキャン方式とを並行して考えていくのが望ましいだろう。いずれにせよ、最終的に必要なのは照射試験片が置かれた場所での強度と一様性を規定のレベルに維持することであり、ビーム分布の整形はそのための手段に過ぎない。Fig. 52 は多極磁場を導入する前の予備計算としてエンベロープを調整したものであり、final focus で x、y 別々に 2 箇所の多極磁場を通すことで矩形状に平坦化する。Fig. 53 は粒子シミュレーションの結果であり、分布としては台形に近く改善の余地がある。

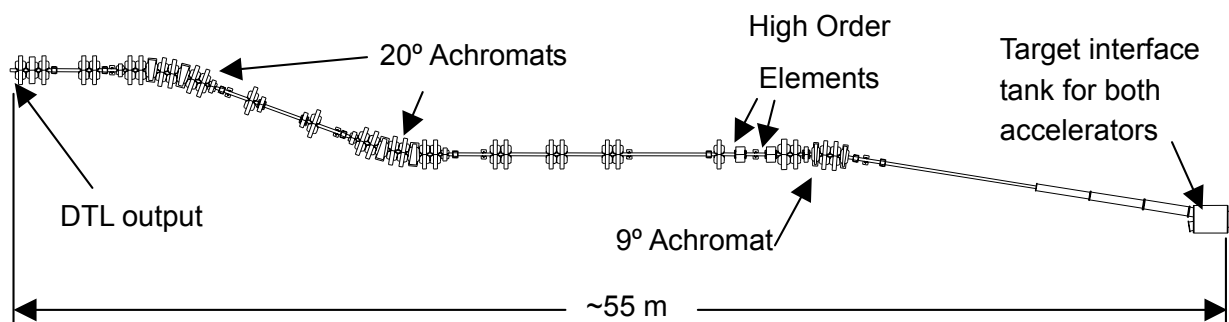


Fig. 51 IFMIF High Energy Beam Transport (from DTL exit to Li target assembly)

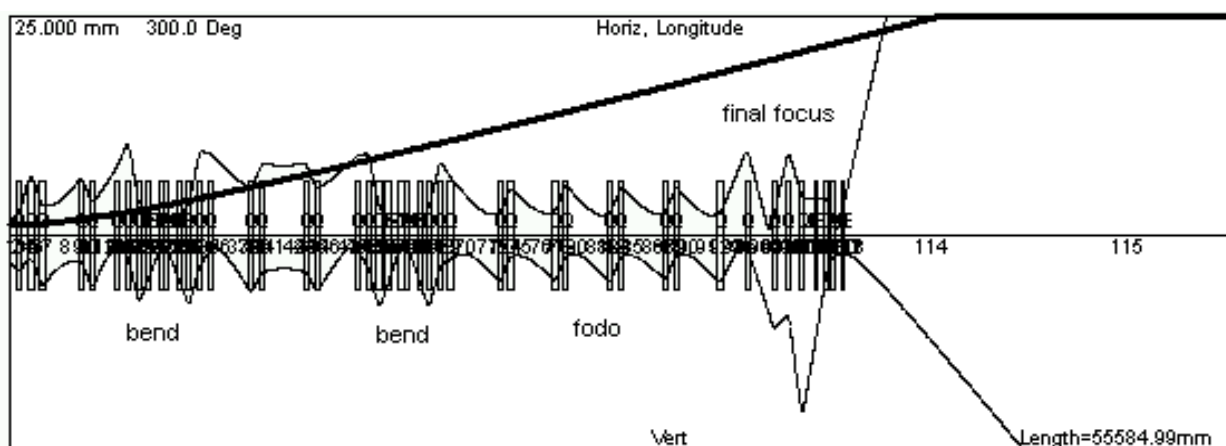


Fig. 52 IFMIF-HEBT のビームエンベロープ計算

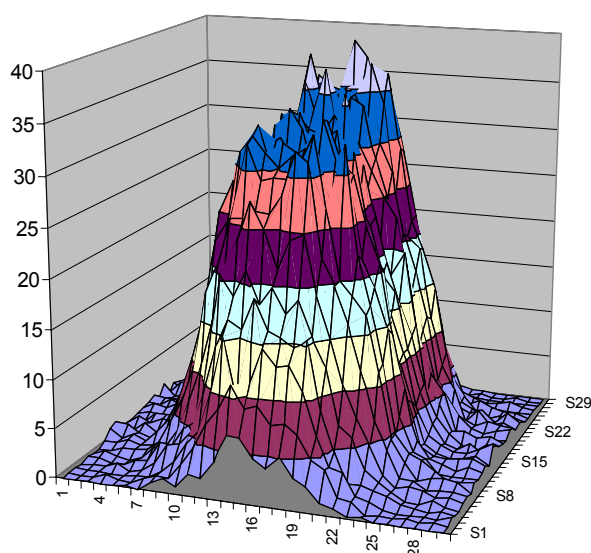


Fig. 53 ターゲット上で得られるビーム密度分布
(Garnett&Wangler の
空間電荷モデル使用)

3.4. 電源部

3.4.1. RF 源

リニアックシステムにとって、RF システムはイオン源に並び、安定運転の実現に際して多くの課題が残るという観点で、また、建設・運転コストの多くを占めるところとして、きわめて重要な役割を受け持つ。極論すると、入手できる

RF 源（自主開発を含め）の範囲でしかリニアックは実現できないといえる。IFMIF 加速器の周波数 175MHz はテトロード系の RF 源が 200MHz くらいまで利用できることが前提であり、現在、1MW CW 主力の性能が出ているターレスのダイアクロードを第 1 候補としている。

Fig.54 に示す 1000 時間の 1 MW 出力運転試験では、平均稼働率 98.7%を達成した(目標 99.5%)。14時間／18回の停止のうち10回はスクリーングリッド異常によるものであった。この試験は 200MHz で行われており、175MHz ではグリッド発熱が緩和されるため稼働率目標の達成も視野に入ってきているとみられる。今後は、175MHz システムへ改造し、空洞負荷の状態での試験へと進む必要がある。

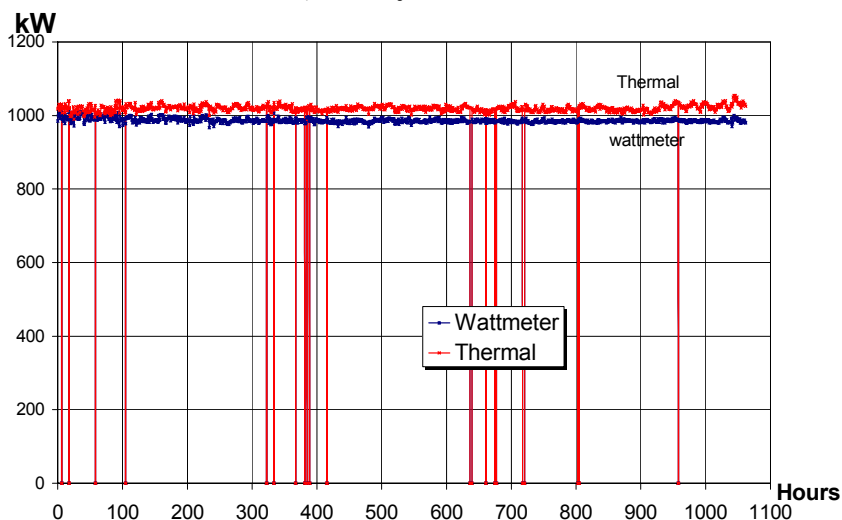


Fig. 54 ダイアクロード出力試験

3.4.2. RF 窓

IFMIF 加速器の RF ドライブはループ型が採用され、伝送系は同軸管が使用される。RF システム要素の中で異常発生の原因として考えられるのが RF 窓での放電等によるリークである。RF 窓材自体は通常のアルミナセラムで十分であり、構造的に熱変形や放電事象に対する耐久性を有することを実証試験することが必要である。現在のところ、シミュレーション計算のレベルでは、既存のモデル (Fig.55) をほぼそのまま適用できるとの感触であり、今後、負荷試験を積み重ねていく予定である。

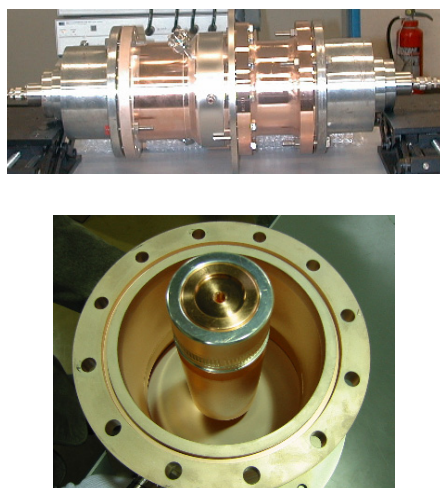


Fig. 55 IFMIF 用 RF 窓 (上 : 側面、下 : 内部)

3.5. ビーム診断

IFMIF に特有のビーム診断技術としては、非接触でのビーム形状計測が挙げられる。これまでの要素技術開発ではイオン源までのビームしか利用できなかったため、低エネルギー用の診断が主となっている。Fig.56 はビームによる残留ガスの発光を分光して計測することで、分子イオンの混在する場合でも、原子イオンのサイズを正確

に測ることができるというものである。

3.6. IFMIF 加速器プロトタイプ

これまでの技術開発によって得られた成果をまとめると以下ようになる。

Table 5 IFMIF 加速器要素技術開発のまとめ

要素技術	開発成果
長寿命イオン源の開発	ECR 型イオン源採用を決定、 ECR イオン源により稼働率 95%以上の定常運転を実証、D ⁺ イオン 100keV-130mA を実証
1 MW-CW 高周波電力システム	高周波源の 1,047 時間運転を実証 (稼働率: 98.7%)、175MHz/500kW-CW 高周波窓を試作し、0.1%以下の低反射率を達成
CW RFQ	ビーム軌道解析により低ビームロスの実現可能性を検証、 RFQ モックアップモジュールを試作し、空洞結合方式 RFQ のモジュール長を 4 m とした (共振周波数は計算解析によく一致)
CW DTL	第 1ドリフトチューブの熱除去の可能性を計算で確認
HEBT	低ビームロスでターゲット入射に必要な矩形ビームへの成形を可能とする設計を実施
非接触型ビーム診断	分光法を併用したビームサイズ計測

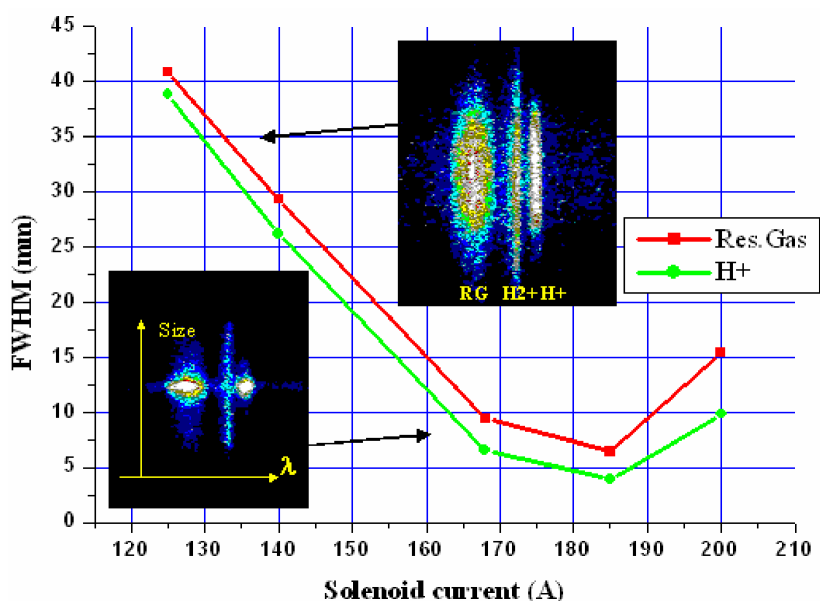


Fig. 56 LEBT の非接触型ビーム診断 : 分光法によるビームサイズ計測

4. おわりに

核融合エネルギーを実現する上で厳しい照射環境に耐える材料を開発することは必須であり、そのための照射試験施設である IFMIF が適切なタイミングで建設されなければならない。そのため、施設を構成する各サブシステムの設計思想は既存の技術から容易に見通せる範囲の仕様を要求することを基本とすべきである。

特に、加速器システムについては、周波数を 175MHz 単一としたこと、また、その構成要素技術として、ECR 型イオン源、4 ベーン型 RFQ、アルバレ型 DTL、1 MW 級の高周波出力管、多重極磁場によるビーム一様化、を主オプションと

して選択したことにそれが現れている。研究開発という面からみると、これらの基本技術を如何に大電流を連続的に安定に発生し制御するかという工学的な部分に重点を置くことになる。この部分は、どちらかといえば、これまで日本があまり挑戦して来なかった分野であり、若い方達が関心を持って積極的に関与して行って欲しいと願っている。日本人の繊細さをもってすれば、もっとも得意分野ではないかと思われるので、若手の力をもってすれば、近い将来、世界を凌駕する成果に発展し得るものであらうと期待する次第である。

参 考 文 献

- [1] P.Grand, PROPOSAL FOR AN ACCELERATOR-BASED NEUTRON GENERATOR, BNL 20159 (1975).
K.Batchelor, et al., PRELIMINARY DESIGN OF A 30 MEV DEUTERON LINEAR ACCELERATOR FOR THE PRODUCTION OF INTENSE BEAMS OF 14 MEV NEUTRONS, 1975 PAC, 1772.
- [2] M.J.Saltmarsh, R.E.Worsham, PROPOSAL FOR AN INTENSE NEUTRON GENERATOR FOR RADIATION INDUCED DAMAGE STUDIES IN THE CTR MATERIALS PROGRAM, ORNL-TM 5233 (1976).
- [3] J.E.Vetter, VORSTUDIE FUR EINE INTENSIVE NEUTRONENQUELLE, KfK-2542 (1977).
- [4] D.Liska, M.D.Machalek, FMIT-THE FUSION MATERIALS IRRADIATION TEST FACILITY, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 1304 (1981).
- [5] M.Sugimoto, et al., ACCELERATOR SYSTEM FOR THE ENERGY SELECTIVE NEUTRON IRRADIATION TEST FACILITY (ESNIT), J. Nucl. Mater. 191-194, 1432 (1992).
- [6] IFMIF International Team, IFMIF COMPREHENSIVE DESIGN REPORT, (2004)
http://www.iaea.org/Textbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartA.pdf
http://www.iaea.org/Textbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartB.pdf
- [7] IFMIF CDA Team, Ed. By N. Martone, IFMIF CONCEPTUAL DESIGN ACTIVITY FINAL REPORT, ENEA-RT/ERG/FUS/9611, Dec. 1996.
- [8] Ed. by A. Moeslang, INTERNATIONAL FUSION MATERIALS IRRADIATION FACILITY CONCEPTUAL DESIGN EVALUATION REPORT, A SUPPLEMENT TO THE CDA BY THE IFMIF TEAM, FZKA 6199, Dec. 1999.
- [9] IFMIF International Team, Ed. by H. Nakamura et al., IFMIF-KEP INTERNATIONAL FUSION MATERIALS IRRADIATION FACILITY KEY ELEMENT TECHNOLOGY PHASE REPORT, JAERI-Tech 2003-005, Mar. 2003.
- [10] K. R. Crandall et al., RFQ DESIGN CODES, LA-UR-96-1836. (revision February 12, 1997)
- [11] R. Duperrier, TOUTATIS, A RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE CODE, Phys. Rev. Specials, Topics Accelerator and beams, December 2000.
- [12] R. A. Jameson, ON SCALING & OPTIMIZATION OF HIGH INTENSITY, LOW-BEAM-LOSS RF LINACS FOR NEUTRON SOURCE DRIVERS, AIP Conf. Proc. 279, (1992) 969-998, Proc. Third Workshop on Advanced Accelerator Concepts, 14-20 June 1992, Port Jefferson, Long Island, NY.
- [13] CEA-DSM-DAPNIA-SACM CONTRIBUTION TO THE IFMIF TRANSITION PHASE 2003, DSM/DAPNIA 04-35.
- [14] L. Young, SEGMENTE RESONANT COUPLED CAVITY RFQ, Proc. PAC 1993, Washington D.C.

Table A1 IFMIF の設計諸元[6]

核融合材料照射源への要求	
中性子束/容積	中性子壁負荷 2 MW/m^2 相当の容積 0.5 リットル ($1 \text{ MW/m}^2 \sim 14 \text{ MeV}$ 中性子束 $4.5 \times 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$ $\sim$ 鉄における照射損傷速度 $3 \times 10^{-7} \text{ dpa/s}$)
中性子スペクトル	第一壁の中性子環境を模擬 (PKA スペクトル、dpa、He, H 生成量)
中性子照射量	2~3 年で $150 \text{ dpa}_{\text{NRT}}$ (DEMO 相当)
中性子束勾配	$\leq 10\%$ (試験片の試験部範囲で)
施設稼働率	70%
照射の時間的連続性	材料からみて擬似的に連続照射となるようにする
接近性	実験・計測のための照射場への接近が良好であること

加速器系	
加速ビーム	平常運転 D^+ ; ビーム試験用 H_2^+ (放射化低減対策のため)
加速方式	高周波リニアック 2 式で構成、
高周波源	175MHz/ 1 MW CW 出力モジュール 13 台で $40 \text{ MeV}/125 \text{ mA}$ のビーム加速
ビーム特性	ビームフットプリント: 幅 20 cm 、高 5 cm 、 エネルギー: $40 \text{ MeV} / \pm 0.5 \text{ MeV FWHM}$ 、 デューティ: CW (調整・起動時パルス)
稼働率	88%以上
保守方法	ハンズオン (最終ベンドまで。局所遮蔽使用。遠隔保守への対応設計を排除せず。)
設計寿命	30年
入射器	ECRイオン源1式 (交換作業を迅速化) 磁場収束式低エネルギービーム輸送 出力エネルギー/電流: $95 \text{ keV}/140 \text{ mA}$ D+比: 85%以上 電流安定度: $\pm 1\%$ (1 MHz 以下の周波数領域) 規格化rmsエミッタンス: $0.2 \pi \text{ mm mrad}$ デューティ: CW (調整・起動時パルス: 繰り返し $1 \sim 20 \text{ Hz}$ 、長さ 1 ms 以上) 運転時電流調整範囲: $50 \sim 140 \text{ mA}$ (パルスの場合、長さ 500 ms 以上) 寿命: 1000時間以上 ビーム停止時間: $10 \mu \text{ s}$ 以内
RFQ	4 ベーン型一体構造、共振結合方式 (3セグメント) 周波数: 175 MHz 入出力エネルギー: $95 \text{ keV}/5 \text{ MeV}$ 入出力電流: $130 \sim 140 \text{ mA}/125 \text{ mA}$ (ほぼ 2 MeV 以下でロス) 全長: 12.5 m 高周波電力: 1.3 MW 空洞損失: 685 kW 規格化rmsエミッタンス: 横方向 $0.4 \pi \text{ mm mrad}$ 、縦方向 $0.8 \pi \text{ mm mrad}$ デューティ: CW (調整・起動時パルス) 保守: ハンズオン (局所遮蔽使用。遠隔保守への対応設計を排除せず。)

DTL	アルバレ型、ポストカップラー タンク数：10 周波数：175MHz 入出力エネルギー：5MeV/40.2MeV 入出力電流：125mA/125mA (放射線管理上のロス限界 $<3\mu\text{ A/m}$ 、目標3nA/m) 全長：30.3m 高周波電力：6.45MW(ビーム電力4.4MW) アパーチャ直径：2.5cm 同期位相：-45~-30° 規格化rmsエミッタンス：横方向 $0.4\pi\text{ mm mrad}$ 、縦方向 $0.8\pi\text{ mm mrad}$ デューティ：CW（調整・起動時パルス） 保守：ハンズオン（遠隔保守への対応設計を排除せず。）					
HEBT	ビームエネルギー/分散：40MeV/± 0.5 MeV FWHM ビーム電流：50~125mA（各ビームラインで。輸送特性が電流に強く依存しないようにする。） デューティ：0~100% ターゲット上のビーム分布：長方形フラットトップ（幅20cm、高5cm） 2ビームの相互関係：ターゲットでフットプリント一致（最終ベンドによりそれぞれ+/-9°偏向される）。独立にビーム輸送可とする。 Li流直前の真空度： 10^{-3} Pa 放射線対策：最終ベンドで中性子のバックストリーム量を制限。磁石は対放射線性のもの。 保守：ハンズオン（最終ベンド以降は遠隔保守）					
RF 源	ステーション	ドライブ数	電力/ドライブ	伝送ロス	マージン	チューブ出力
	RFQ1	2	216 kW	86 kW	52 kW	570 kW
	RFQ2	2	216	86	52	570
	RFQ3	2	216	86	52	570
	MS	2	20	8	5	53
	DTL1 (32セル 4.64m)	2	339	136	81	895
	DTL2 (14セル 2.59m)	2	323	129	78	853
	DTL3 (13セル 2.79m)	2	346	138	83	913
	DTL4 (11セル 2.64m)	2	328	131	79	866
	DTL5 (10セル 2.63m)	2	327	131	78	863
	DTL6 (9セル 2.55m)	2	316	126	76	834
	DTL7 (9セル 2.72m)	2	335	134	80	884
	DTL8 (8セル 2.56m)	2	315	126	76	832
	DTL9 (8セル 2.69m)	2	330	132	79	871
	DTL10 (6セル 2.1m)	2	267	107	64	705
全所要電力						10,280

ターゲット系	
ターゲットアセンブリ リチウムジェット	ジェットサイズ：厚 0.025m、幅 0.26m、流速：15m/s (10-20 m/s 可変)、 ビーム照射前の温度 250℃、

ジェットノズル	2 段階圧縮（全圧縮比 10）、内面粗さ $\sim 6\mu\text{m}$
背面壁	凹面(曲率半径 0.25m)、背面壁部分のみ毎年（11 ヶ月）交換
リチウムインベントリ	9m^3
リチウム中不純物	トリチウム： $<1\text{wppm}$ ～ 水素同位体総量で $<10\text{wppm}$ C,N,O それぞれについて： $<10\text{wppm}$
腐食・損耗許容量	ノズル/背面壁で $1\mu\text{m}/\text{年}$ 、その他の部位で $50\mu\text{m}/30\text{年}$

テストセル系	
高中性子束域 対象材料 実験内容	低放射化構造材料（フェライト-マルテンサイト鋼ほか） 計測つき照射キャプセルで照射し照射後試験を行う
中間・低中性子束域 対象材料 実験内容	低放射化構造材料（フェライト-マルテンサイト鋼ほか） 計測つき照射キャプセルで照射し照射後試験を行う
高中性子束試験モジュール ガス冷却ループ 核発熱	He 0.3MPa、入口温度 50°C 、流量 $0.186\text{m}^3/\text{s}$ 、圧損 0.05MPa 総発熱量16.62kW、ヒーター最大28.3kW(試料温度 600°C ヒートアップ時)

その他施設	
建屋	加速器室： $L\times W\times H: 120\text{m}\times 60\text{m}\times 8\text{m}$ ターゲット・テストセル室： $L\times W\times H: 70\text{m}\times 60\text{m}\times 26\text{m}$
遮蔽壁	最大で 4.3m（テストセル真後ろ）立入り許可域で $10\mu\text{Sv/h}$ を確保
空調系	非管理区域： $5,700\text{m}^3$ 、管理区域（5 段階）： $96,445\text{m}^3$
電力・冷却水系	電源容量 50MVA、冷却能力 40MW
放射性廃棄物処理	液体処理： $10\text{m}^3\times 2$ ヶ所、気体処理： $100\text{m}^3/\text{h}$ 、固体：保管