

[12P-05]

Status of Linac Design for Fusion Neutron Irradiation Facility – IFMIF

M. Sugimoto

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

Tokai-mura, Ibaraki 319-1195, JAPAN

Abstract

The conceptual design study of IFMIF has been completed at the end of 1999 by employing a reduced cost version and the staged construction scenario to achieve the final objectives to supply 500 cm³ irradiation volume with 10¹⁴ (/cm²/s) neutron flux. In the next three years, some essential technologies of key components are investigated to confirm the conceptual design. For the accelerator system, the long-term operation of high-current D⁺ injector, the cold model of coupled cavity cw-RFQ for 175 MHz, the heat removal from Drift Tube in cw-DTL, and some RF system components are selected as the tasks carried out by the international collaborations.

核融合中性子照射施設 - IFMIF のためのリニアック設計の現状

1. はじめに

IFMIF「国際核融合材料照射装置(International Fusion Materials Irradiation Facility)」は、核融合炉のための材料開発に不可欠な 10¹⁴ (/cm²/s)以上の 14MeV (相当)中性子を D-Li 反応で発生させて照射試験を行う装置である[1](図 1 に示すようにターゲットにもっとも近い場所では材料原子が年間あたり 20~50 回弾き飛ばされる)。1995 年に始まった概念設計は国際エネルギー機関の国際協力に日米欧露が参加し 1999 年末をもって完了した[2]。

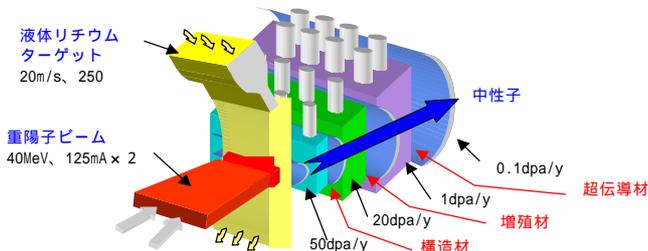


図 1 D-Li 加速器型核融合強力中性子源の概念

本加速器の最大の特徴は、大強度の中性子を多くの試料に均等に照射できるようにアンペア級 40MeV 重陽子を連続で加速することが要求される点にある。概念設計では、稼働率を向上させるためにハンズオンでの保守が不可欠との考えから、ビームロスによる放射化を最小限に抑えるためのいくつかの設計規範を採用した。

- 1) 所要ビーム電流を複数の加速器モジュールで分担して供給する (125mA モジュールを単位とし、2 台もしくは 4 台で構成する)。
- 2) 機器の放射化を避け、ターゲット表面に矩形一様なビームスポットをつくるため 1 mm・mrad (normalized, rms)以下の低エミッタンスを目標と

- する (175MHz RF リニアックを採用、ただし 150MHz 程度まで下げる可能性も同時に検討)。
- 3) 稼働率 88%を達成するため RAM (Reliability, Accessibility & Maintainability) 解析を重視し、機器構成に反映させる (イオン源数、RF システム)。
- 概念設計のまとめとして、基本案コスト (約 840 億円) を削減し、かつ段階的に建設が可能な代案の要請があり、最終的に図 2 に示すような形になった (約 500 億円)。大きな変更としては
- (1) 2 箇所あったターゲット及びビーム調整ダンプの 3 ステーションを 1 個所にまとめた。
 - (2) 加速器モジュール数は 2 とし、水平面上にレイアウトして占有容積を圧縮した。
 - (3) 2 つの加速器モジュールは別々の時期に建設可能とし、さらに第 1 モジュールの RF 源を当初 50mA 加速分だけ建設することにした (第 1 期のコスト約 300 億円)。

このような 50/125/250mA の 3 段階建設により、最終目標である重照射の前に候補材の絞り込みや工学データ取得のための目的別照射の先行実施が可能となった。

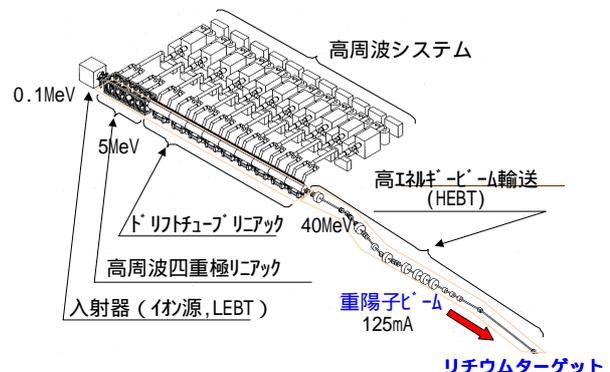


図 2 125mA 加速器モジュールのレイアウト

2 . RFQ

IFMIF RFQ の主な仕様は 175MHz、 $q/m=1/2$ 、入力/出力エネルギー 0.1/5MeV(基本設計は 8 MeV)、結合空洞方式(全長~8m)、エミッタンス 0.4 mm-mrad (normalized, rms)であるが、重要なのは D ビームを加速する点である。5 MeV を越すと(d,n)反応による大量の中性子発生が顕著になり、より低いエネルギーでも材料表面に吸着した D との D+D 反応中子が発生するため長期間運転後の保守性を保つために極限までビームロスを抑える必要がある(図 3 はビームシミュレーション例)。

ビームロスの原因は(1)入射器からのビームのミスマッチ、(2)空洞内電場の不均一性や時間的乱れ、(3)DTL へのビーム引渡しのミスマッチがあり、それぞれ設計上の考慮が必要となる。基本仕様の 8MeV 出力は後述するように DTL のビームダイナミクスに沿った磁場強度設計要求から導かれたものであり、コスト削減に伴う設計の合理化検討の中でシャントインピーダンスが低い RFQ は、もっと低めの出力で要求ビーム性能が達成できることが望ましい。いずれにしても RFQ 全長は単独空洞でつくるには長過ぎるため、LANL の APT/LEDA で開発された結合空洞方式[3]をとる。ただし、それらは 350MHz、全長 ~ 8m、陽子用である。周波数のスケールアップだけからいうと、波長が 2 倍なので十分達成可能なように見えるが、ハイパワーマシンであるため結合空洞全体の長さを 12m とすることにはリスクがあり、ビーム損失による放射化が発生した際の対応も DTL に比べ困難である。

プロトタイプ試験ではインテグレートした状態での性能保証が重要であり、最短期間で開発目標を達成するにはフルプロトタイピングとすべきであり、開発費も含めた全体コスト圧縮のためにも RFQ サイズは縮小する必要がある。

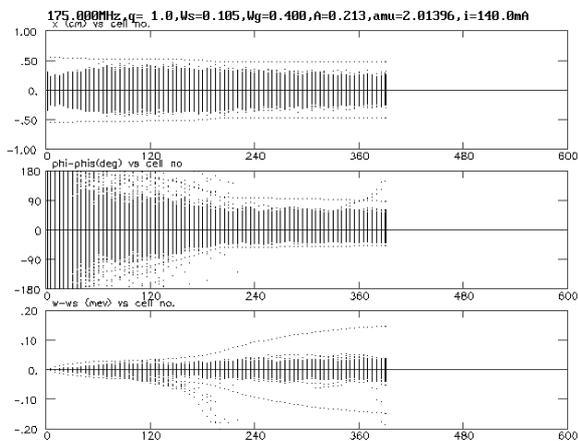


図 3 IFMIF-RFQ のビームシミュレーション結果

3 . DTL / SCL

概念設計では「既存の確立した技術に基く」方針が適用され、常伝導 DTL が基本案として採用され、エミッタンス劣化の程度が低い FoDo 収束構造を採用した。ポア径は 3cm としたため、図 4 に示すように 175MHz の FoDo 構成で必要な Q 磁場強度を達成するには入射エネルギーは 8 MeV 程度が要求される。合理化設計変更で 5 MeV に下がることへの対策として(1)FoFoDoDo 構造に変更、(2)ポア径も縮小、が考えられるが、図 5 に第 1 タンクに FoFoDoDo 構成を採用してビームシミュレーションを実行した結果を示す。

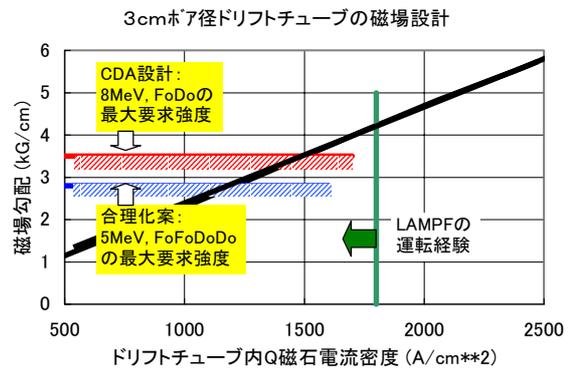


図 4 IFMIF-DTL 収束磁場構成の選択

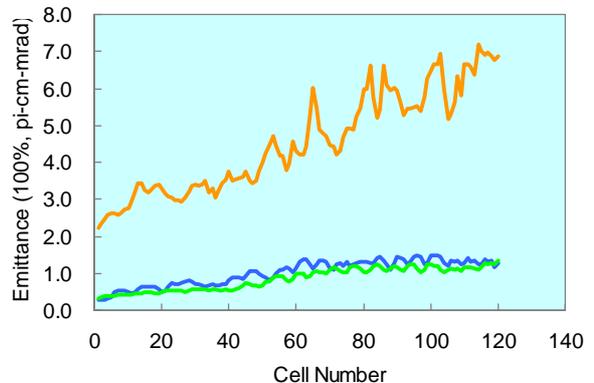


図 5 IFMIF-DTL のビームシミュレーション

概念設計当初から超伝導リニアックは DTL の有望な代案として検討され続けてきた。低ベータ空洞が必要なため、図 6 のような $1/4$ 空洞の 2 ギャップ方式[4]をはじめとするいくつかのタイプが提案されているが、コスト的に引合うためには RF システムをどう簡略化できるかが鍵となる。その性能を引き出すには空洞ごとの独立 RF 制御が可能な方式が望ましく、将来、固体素子アンプで 100kW クラスのものが低価格で供給されるようであれば、DTL に置き換える可能性は大いに高まる。

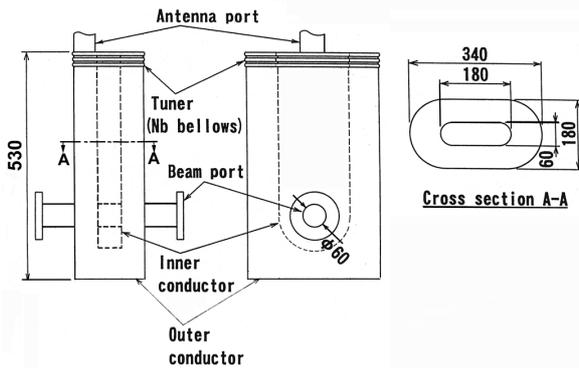


図 6 IFMIF-SCL の quarter-wave 空洞

4. RF システム

段階的建設に沿った設計では、最初の DTL タンクを除く全ての加速空洞タンクについて、2 台の RF 源ユニットから同時に RF を供給する必要がある。ユニット当たり最大 1 MW の RF 出力は RFQ、DTL それぞれ 4 ドライブ、2 ドライブに分配する。このようなマルチドライブ構成では、各の干渉効果を考慮した解析が必要であり、故障時の対応についても、1 ユニットだけの故障ならビーム電流を下げて運転継続も可能であるため、いくつかのシナリオが考えられる。また、合理化設計では最終段アンプの後にあったサーキュレータを除くことにした。最終段 RF アンプは Thomson の Diacode TH628 が 200MHz で 1 MWcw 連続 8 時間運転に成功しており、IFMIF RF システムに適用可能と考えられている。図 7 にシステムブロック構成を示す(コストはプロトタイプで約 2.2M€[5])。

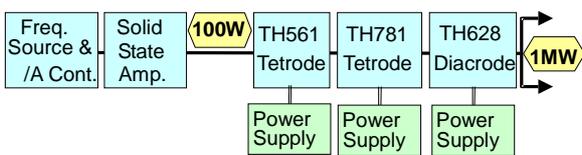


図 7 IFMIF 加速器の RF 源システム

5. 入射器・ビーム輸送

これらの要素はリニアックとのビームの受渡しを行うフロントエンドとして全体の稼働率を維持するために性能の向上と設計の最適化が重要な部分である。合理化設計の現状は、概念設計の基本方針を踏襲しているが、移動式のビームダンプやビーム診断技術の改良とあわせて設計の詳細化が残された課題である。

6. 要素技術確証

概念設計では基礎技術としては既に確立したものをベースにしたものの、現実に総計 10MW のビームを取扱っている例は無いため、本当に既存技術の延長線上のものかどうかをできるだけ早い時期に確認しておく必要がある。そのため、2000 年からの 3 年間を要素技術確証フェーズとし、各構成要素の中でも重要性の高い(1)入射器性能、(2)RFQ コールドモデル、(3)DT 除熱、(4)RF コンポーネントについて、最終性能実現への見通しを得るための技術開発を実施する。加速器を含む各サブシステムについて国際分担で協力するとともに、国内では大学・原研が共同で開発にあたる

7. まとめ

核融合炉という概念を抱く限り常に材料問題が浮かび上がる。長年にわたる比較検討の結論として、重陽子加速器を用いた中性子源が現実的かつ最適な選択である。問題は必要とされる 10MW ビームを安全、安定に長期間供給できるシステムが構築できるかという点にある。安定性の面からもっとも懸念されていた入射器、RF システム共に最近の技術の進歩により十分に実現を見通せる段階に来ており、着実にプロトタイプを進めることにより概念設計で求めた仕様達成が可能と考えられる。その意味で、今年から始まる要素技術実証そして、その先の工学技術実証における開発内容を精査していくことが極めて重要である。

参考文献

- [1] T.Kondo, H.Ohno, R.A.Jameson and J.A.Hassberger, Fusion Eng. Design, 22, 117 (1993).
- [2] IFMIF-CDA Team, IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity Final Report, ENEA Frascati Report, RT/ERG/FUS/96/11 (1996); IFMIF Conceptual Design Evaluation Report, Ed. A.Moeslang, FZKA 6199, Jan. 1999.
- [3] L.M.Young, Proc. 1994 Int. Linac Conf., Tsukuba, 1994, p.178.
- [4] Y.Tanabe, et al., Fusion Eng. Design, 36, 179 (1997).
- [5] Fusion Neutronics Laboratory, JAERI-Tech 2000-014, pp.186-187.