

解説

核融合炉材料開発のための強力中性子源

—国際共同施設 IFMIF 概念設計活動の動向—

近藤 達 男

(東北大学大学院工学研究科)

(1995年11月13日受理)

Intense Neutron Source for Fusion Material Development — On the Status of IFMIF Conceptual Design Activity

KONDO Tatsuo*

*Department of Machine Intelligence and Systems Science, Tohoku University,
Sendai 980-77, Japan*

(Received 13 November 1995)

Abstract

Following the discussion on urgent need and expected role of the high energy intense neutron test facility in fusion materials R & D, the current status of the conceptual design activity of IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) is described.

Keywords:

IFMIF, fusion material development, intense neutron source

1. はじめに

1994年6月, 日, 米, 欧州連合およびロシア共同の核融合炉材料のための中性子照射試験施設の概念設計, IFMIF-CDAが発足し, 95年10月には設計統合作業が行われて中間報告[1]がまとまった.

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)は大輝度線形加速器で重陽子を液体リチウムのターゲットに入射させ, ストリッピング反応で核融合炉第1壁の条件に近いエネルギースペクトルの中性子を発生させて, 材料の照射試験に利用する施設である. CDAは97年春完成を目的に国際エネルギー機関核融合材料研究開発協力実施協定の活動のひとつとして進められている. 以下に, 歴史的な背景と意義, 現活動の内容と進捗状況, 今後の展望などを含めて解説する.

*日本原子力研究所客員研究員

2. 核融合開発と材料中性子照射試験の意義について

核融合炉の主要な部材は多かれ少なかれ中性子照射場で使われるので, 中性子の影響を無視した材料データは適合性や特性の把握が困難であり, 炉設計にはとうてい結びつかない. 照射研究は, 材料の挙動予測や耐久性の保証を念頭に, 終始核融合中性子のエネルギースペクトル(14MeVにピーク)の特異性を焦点にしてきた.

中性子施設の話に入る前に, 核融合材料開発について2, 3の指摘をしたい.

第1は, 中性子と材料の両立問題はエネルギーシステムの成立性を左右するという観点である. 分裂炉では利用すべきエネルギーが核燃料の中で大半熱になり, 被覆材を介して冷却材に伝達されるのに対し, D-T核融合

炉の設計概念では「中性子として構造材料の壁を通り抜けて」ブランケットに達し熱に変わる仕組みをとる。そこで最も重要なエネルギー伝達経路にあたる構造部材に注目すると、要求される主な性能は核分裂では耐熱性、核融合では耐照射性である。核融合で「生成エネルギーを合理的に利用できるか」の問題はこの観点でみると、壁材料が単位面積当たり何個の中性子の通過に耐えられるかにシステムの効率と耐久性が直接依存することになる。さらに、成立性とはいわないまでも、高エネルギー中性子による構成材料の超長期的な放射化が核融合技術の社会受容上無視できない認識になりつつあり、低放射化材料の開発のためにはそれらの材料の核的特質から、高エネルギー中性子重照射試験が必須と言われる。

第2に、世界的な中性子照射ベッドの逼迫傾向の問題がある。核融合材料開発の柱ともいえるべき重照射研究には従来代替手段として高中性子束核分裂炉が当てられてきた。それらは混合スペクトル炉では HFIR (米国) や HFR (オランダ)、高速炉では FFTF, EBR-II, (いずれも米国), Phoenix (フランス) 等であるが、近年の原子力開発の退潮傾向で FFTF, EBR-II の利用は既に困難となり、他の有力炉の将来も楽観はできない。

第3は、材料の開発と適用のタイミングという開発戦略上の問題である。核融合システム設計としては、開発のなるべく早い時期にどんな材料を、どう使うか、一応の工学的見通しがなければならない。先述のエネルギー転換・供給システムの成立性との関係を考えて、目標設定と解決手段がバランスしない現状のままを続けるのは問題であろう。核融合材料開発は既存の材料生産体系にない材料を作り出して使うことを目標達成の条件とする、いわば「材料革新」が前提である。その最も有力、不可欠の手段をここで述べる高エネルギー中性子照射施設と考えるなら、どんな機能を持つ施設をいつまでに稼働させるかは、核融合エネルギー開発の戦略の中心課題の一つといってもいい過ぎではないであろう。

3. 高エネルギー中性子照射施設が急がれる理由

上述のことから必要性は既に自明であろうが、その「切迫度」について今少し述べる。読者の中にはなぜ核融合装置で材料の実験をまかなえないか、あるいはなぜ加速器型の中性子源を使う IFMIF の概念が選ばれるかに疑問を持つ向きもあるであろう。簡単なため従来議論が繰り返されてきたいくつかの問題点に対する当面のコンセンサスを予め列記する。

1) 材料試験には中性子束ないしフルエンスで実用と同

等または加速的な条件が要求される。各開発段階の核融合装置の照射場ではこの条件は満たせない。(これは、炉心との距離で加速条件を達成できる核分裂炉開発の場合との基本的な相違点である)。また、いわゆる 14MeV D-T 中性子源では必要な中性子束の 1/1000 程度しかまかなえない。

- 2) 照射場のエネルギースペクトル, 中性子束, 照射量 (フルエンス), 安定性, 均一性, 試験体積, 技術的实现性 (技術成熟度) 等の条件を満たすのは加速器型 D-Li ストリッピング方式 (以後 d-Li 型, 詳細後述) のみである (IEA IFMIF Working Group の結論[2])。
- 3) 材料の開発・試験, 設計データの蓄積には長いリードタイムが必要であり (一般に 15 ~ 25 年), さらに施設の設計, 建設, 稼働までの時間 (8 ~ 10 年) を加えると極めて早い着手が必要である。

4. 核融合炉材料照射試験手段の要件

核融合炉材料は、一般工業材料は勿論、核分裂炉材料に比べても、部材の種類と機能要求の多様なこと、充たすべき性能要求のほとんどが中性子照射下特性にかかわることなどで特徴的である。とくに、工学的な段階の材料の開発試験においては、近似度 (中性子のエネルギースペクトル) と併せて材料設計へフィードバックするための効率 (すなわち中性子の強さと安定性) が生命であることから、照射試験には原則として次のような基本的要求がなされる [3];

- 1) (スペクトル) なるべく近似度の高い質的条件の照射を,
- 2) (照射体積) 必要な試験体積に対してできるだけ均一な分布で,
- 3) (中性子束) 実用水準と同等以上, できれば効率上 2 ~ 3 倍加速の条件で,
- 4) (フルエンス) 部材寿命時期相当の損傷を与えるに必要な期間安定に保つ。

既存の手段はいずれもこれらのどれかを部分的にしか満足しない。

5. 材料用高エネルギー中性子施設のための過去の活動

核融合炉の開発にとって、中性子環境と材料の両立の問題が重要であることは開発開始当初からの世界の共通認識であった。それを反映して、米国では FMIT (Fusion Materials Irradiation Test Facility) が早くも 1978

年から84年にかけて、当時2億ドル余を投じて開発されたが、政治情勢の変化による資金問題から不幸にして計画は建設寸前で挫折した[4]。この中断が回避できたなら今日の核融合材料開発は全く別の展開を遂げていたのではないと思われる。達成された高水準の技術基盤は今日のIFMIFの基礎となっている。

5.1 適合中性子源の選択と改良

FMIT計画(1978-1985)は加速器、ターゲット、照射実験セル、試験技術などからなる総合プロジェクトで、LINACで加速した重陽子を液体Liの高速ジェットフィルム流に入射させ、D-Li stripping反応で入射軸方向背面に発生する中性子を照射場として利用する機構を採用した。Fig.1はD-Li中性子源の原理図である。

筆者は1983年の国際専門家による技術評価に参加した。そこで、D-Li方式は次の3点を技術的な課題としながらも完成度の高い技術として高い評価を受けている。課題は、

- 1) エネルギースペクトルに明確なピークがあり、核融合第1壁条件を十分良く近似する。ただし、高エネルギー側に尾を引く(High Energy Tail)部分の影響に注意が要る。
- 2) 点線源のために照射体積が限定され、照射場のフラックス勾配が大きい。
- 3) 加速器、ターゲット、照射実験技術それぞれの完成度は高いが、設計統合段階の作業を残している。

FMIT計画の中止以降、これに匹敵する計画はつくられなかったが、国際的な連帯の中で材料研究者(ユーザー)の活動が切れ目なく続けられてきた。とくに、IEA(国際エネルギー機関)の核融合材料研究実施協定に基づく多国間協力の活動では、適合中性子源の最適概念の選択を目的に、加速器、プラズマ装置、照射試験を含む各種施設設計、中性子工学、安全性など広い観点

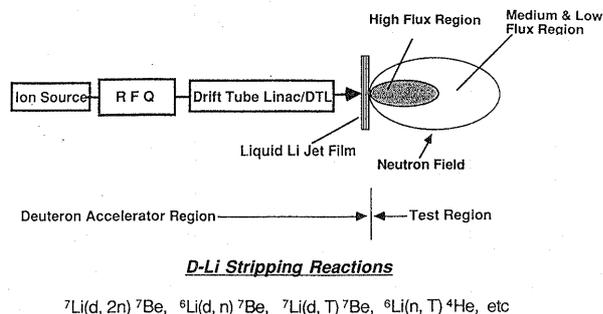


Fig. 1 Principle of a D-Li stripping type neutron source for irradiation test of materials. The neutron field formed behind the liquid lithium jet film is utilized for irradiation testing of materials.

からの検討活動を組織的に行った[3]。国内では、施設概念の改良としてESNIT(Energy Selective Neutron Irradiation Facility)構想が原研を中心に1988年以来5年間集中的に検討された[5,6,7]。これら一連の活動の結論[2]として、技術基盤と実現性、合目的性、タイミングの観点からD-Li strippingの概念が今日、実現可能な唯一のものであるとの考えに至ったのである。この間、加速器技術の進歩、さらにFMITで指摘された3つの問題点へ対応ができたことなどがIFMIF設計に踏み切る上で直接的な原動力となった[8]。

それらの答えにあたる、技術的対応とは以下のようなものである：

- 1) High Energy Tailは入射重陽子エネルギーの調整、選択によって原理的にも、技術的にも対処可能なことがESNIT研究によって示された。Fig.2にそのヒントになったd-Li反応で生ずる中性子エネルギー分布と入射重陽子エネルギーとの関係を示す[9]。
- 2) 照射場体積は加速ビーム電流を現行技術で可能と考えられる限界近く(125MA×2=250MA程度)まで増加させることと、ようやく技術的成熟をみた試験片微小化により解決可能と判断された。Table 1にビーム断面共通時のビーム電流と照射体積の関係を示す[3]。
- 3) 設計統合は、国際協力で設計、開発活動を進める中

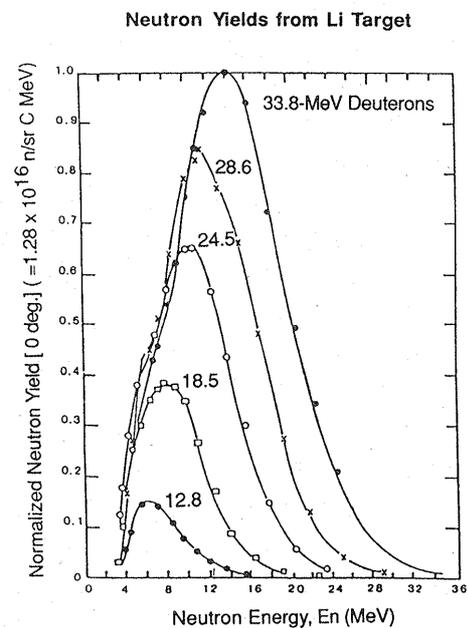


Fig. 2 Neutrons from deuterons of different energy incident on thick lithium target [9]. The dependence is utilized in the design of IFMIF to provide its neutron energy-selectivity function.

Table 1 Available test volume vs. deuteron beam current calculated for D-Li facilities. For a comparison, the value for RTNS-II, the rotating target type pure 14 MeV source, is shown also [8].

	Available Test Volume (cm ³)			
	RTNS-II	ESNIT 50mA	FMIT 100mA	IFMIF 250mA
10 ¹⁶	--	--	--	--
10 ¹⁵	--	--	8	40
10 ¹⁴	--	150	480	1,850
10 ¹³	0.01	5,800	16,800	56,000

で達成する。

6. 国際共同設計活動

これらの施設概念の評価・選定活動は、1993年および翌年のIEAの核融合国際協力の調整会議(FPCC)にとりあげられ、日米欧露の合意で1時期を画するに至った。同会議の勧告に従って国際協力による概念設計活動をまず日本の主導で企画準備した。準備の結果、1995年2月に2年間実施が合意され、発足した活動は現在概念設計の基本的な作業を終えて中間報告をまとめた段階にある[1]。今後は安全性、コスト等の評価を経て97年初頭のゴールを目指す。

この2年間の概念設計に続いて、現在想定されるエンジニアリングと詳細設計、建設などの期間を総合すると、純技術的にはおおよそ2004-5年頃に実験実施の段階に至ることが期待される。

6.1 CDAの目的と使命

動力炉に至るまでの核融合炉の候補材料試料を使用全寿命期間相当までの条件で、十分な照射強度と体積で試験することができる加速器型重陽子リチウム(D-Li)中性子源施設を実現するため、概念設計活動によって参照設計(Reference Design)および、プロジェクト基盤を用意することである。

6.2 CDAの構成

概念設計活動は、IEA協定の枠組のもとに各参加セクタから1名の代表で構成されるCDA-Subcommittee(議長筆者)が運営し、技術活動は、CDA Technical Staff(Leader, T. E. Shannonn, Deputy Leaders 日, 米, 欧各1人)が推進する。各セクタそれぞれ約6~8人・年程度の資源を投入、これにロシアが準メンバーとして加わり、総力は約25人・年である。したがって延べでは数十人の異なる分野の専門家が関与していることになる。

設計作業は、要素技術としての1)試験セルと実験系、2)液体金属ターゲット系、3)加速器系の3分野に、4)設計統合の4チームを並列に推進している。この活動の特徴の一つは執行委員会に直結するUsers Group(Leader, K. Ehrlich)の要求仕様確定の活動を常に先導させながら技術要素を集約し、システム設計を統合していくという戦略を堅持していることである。

6.3 IFMIFへの性能要求と施設のあらまし

要求項目は、試験条件、試験項目、対象材料並びにシステム、照射実験モード等が一通り規定されているが、詳細は省略する。ここで上記4.の1)~4)に述べた性能要求に対して現設計がとっている値はおおよそ次のように要約される；

- 1) 重陽子入射エネルギー：30, 35, 40MeV
- 2) 中性子：2MW/m²相当以上での照射試験体積は最低0.4リットル、縦横方向の勾配は10%以下、最低有用中性子束と試験体積の関係は0.1MW/m²以上でおおよそ10リットルとする
- 3) 積算照射量：おおよその目安として、高中性子束部で2~3年間にフェライト系鋼で実証炉構造材料で要求する100dpa(1MW年/m²が約10dpa相当)の原子変位損傷を与えることができる。
- 4) 照射体積：上記2MW/m²で0.4リットルの中に、5MW/m²相当の高中性子束体積が約100ミリリットル含まれる。ちなみに、現設計で中性子束と有効体積のおおよその関係を計算に基づいて示すと；50dpa/年以上0.1リットル、20dpa/年以上0.5リットル、1~20dpa/年6リットル、0.1~1dpa/年8リットルとなり、また、0.1dpa/年までの低中性子束領域(詳細評価中)については100リットル以上と、セミコンポーネントの試験が出来る体積になると考えられる。

このほか、中性子束連続性(時間構造)、運転上の要求、実験操作性、環境-安全性-保健要求、信頼性、稼働率、管理保守、増力可能性等が決められている。

6.4 CDAの現状

現時点の設計活動の焦点のいくつかをここでトピック的に紹介する。

創意を必要とするこの活動で特徴的なことは、しばしば大幅な発想の転換が求められることである。例えば、そのきっかけの多くがユーザーズグループから発信され、試験技術→ターゲット→加速器→システム統合という順序で処理されている。

- 1) スペクトル適合性と照射体積の確保

良く知られているように、核融合炉材料の照射効果について当面問題点とするところは、材料中の核変換反応による不純物元素の生成と、粒子衝突が引き起こす結晶格子構造の乱れ（損傷カスケード）が複雑に絡む結果、材料の諸物性、寸法、変形・破壊抵抗などに単純に予測しがたい変化が考えられることである。IFMIFによる材料の照射試験では、核融合中性子特有の核変換生成原子の量と原子変位損傷の起こる速さの割合（ppm/dpaで示す習慣）が核融合炉実機に期待される水準と比べ、当面の核データの不確実性を勘案してもファクタ3以内で保証できるものと期待される。これは、対象が金属であるか、炭素やセラミックスであるかなどで異なり、必要に応じて先述のエネルギー選択を適用する。また従来照射場のキャラクタが試験片のない条件で計算評価されてきたのに対し、現在は入射軸に対する角度依存性、空間分布などの詳細や試験片の装荷状態 (Collided) を考えて分析されるようになり、設計は一段と厳しさを増した。この問題の対処には、材料開発試験計画と整合する標準的な試験片装荷を具体的に決め、これと中性子照射場の検討を連動させて、実効性のある設計に至る方法をとっている。

2) ターゲットと試験系、加速器系のインターフェース問題

液体金属リチウムの流動ターゲットはFMIT計画での完成度が高く、相当の信頼性が期待できるとされる。Fig.3に示すようにこのターゲットでは、薄いジェット

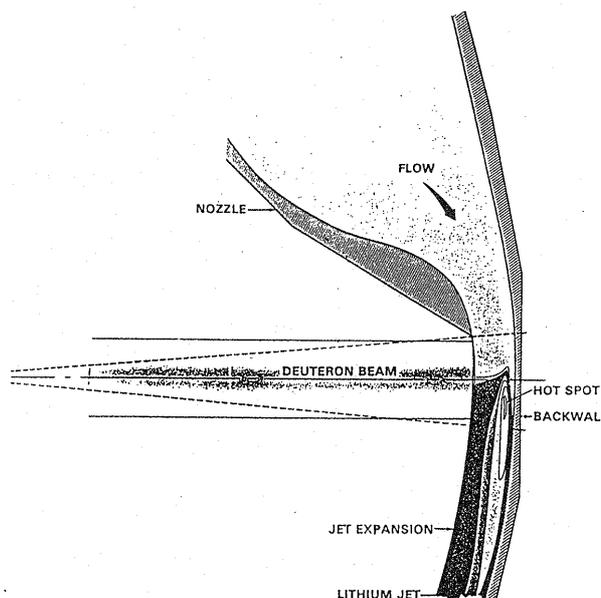


Fig. 3 Beam heat addition to the FMIT-type lithium target [11]. Managing the peak temperature at the hot spot was one of the critical issues in the stage of the FMIT design.

フィルムの厚みの中央付近にビームストップによるホットスポットを位置させて、厳しい発熱の問題を処理する画期的な方法をとっている[4]。また曲面バックウォールは流体に遠心力による圧力を生じさせ、液体リチウムの沸点を高めることを狙っている。念のため真空系で流体表面に入射ビームがもたらす蒸発やスパッタリング等の効果についての理論予測と実証経験の積み上げは

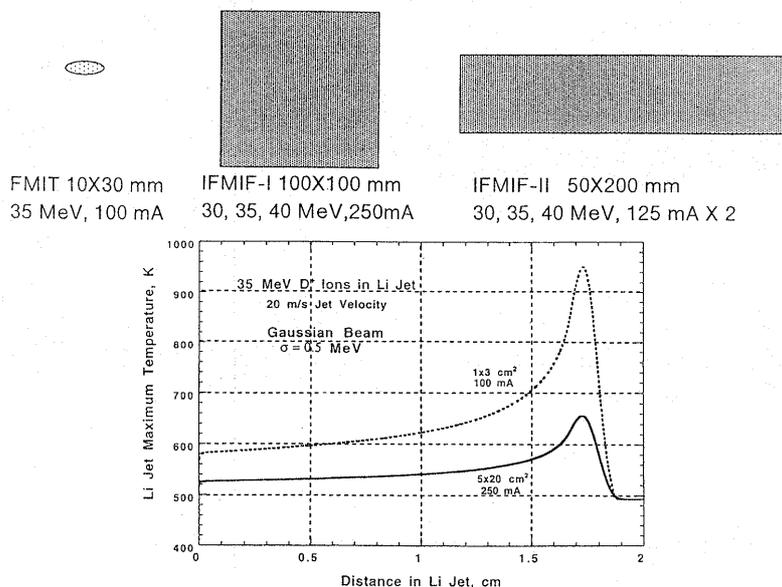


Fig. 4 Design improvement in beam spot geometry and heat load on liquid metal target. The current IFMIF design with 5 × 20 cm beam foot print on lithium target surface provides substantial temperature margin to the boiling point as well as favoring the quality of neutron irradiation field.

今後も続けられる。

一方、試験体積の要求が加速器ビーム電流の増加をもたらし、それによる熱負荷の増加をどのように処理するかが IFMIF 設計の注目点の一つであった。これに対し、ビーム断面の形状・寸法をパラメータにした最適化が検討された。FMIT の設計では、限られたビーム電流で最大の中性子束を作るために $3\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ と絞られていたのに対し、IFMIF では、ユーザの希望で照射場の幾何的条件の最適化とフラックスの均分化をはかる過程で、液体ターゲットの流れ方向の熱除去能力の限界を踏まえた最適値としてビーム断面を $5\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ に変更した [10]。実はこの変更がビーム電流の増加による設計上の負担緩和の方向に作用し、結果的にターゲット設計に余裕をもたらす結果となった。これには中性子工学の専門家の寄与が大きく貢献した。Fig.4 にそれらの関係を概念図で示す。

3) システム統合

システム全体としてのバランス、基本的な要求に対す

る性能保証、建設保守のコスト、安全性、スケジュール等が総合的に検討管理される。例えば、上記のような変更が処理される場合、その部分に止まらず、実効照射試験体積や中性子束勾配、スペクトル、試験片温度制御等の様々な問題に波及する。

95年10月、各要素分野の検討結果を踏まえた集中的な設計統合作業が CAD エキスパートを交えておこなわれ、標準設計のレイアウトが作られた。Fig.5 は IFMIF 基本設計の施設の全体側面図の1つである。この図では 125 mA 単位の加速器モジュール2本がレベルの異なるフロアから同一面に各々 10 度の傾きで上下から入射する形を取り、将来必要に応じて上下各2本を、つまり、 $2 \times 125\text{ mA}$ 各2セットで、将来必要に応じて合計 500 mA 相当の設備容量まで増力が可能な配置になっている。

4) 概念設計中間報告

この結果は96年2月の FPCC に報告される。こうした活動が滞りなく進行するには、経験と信頼できるデー

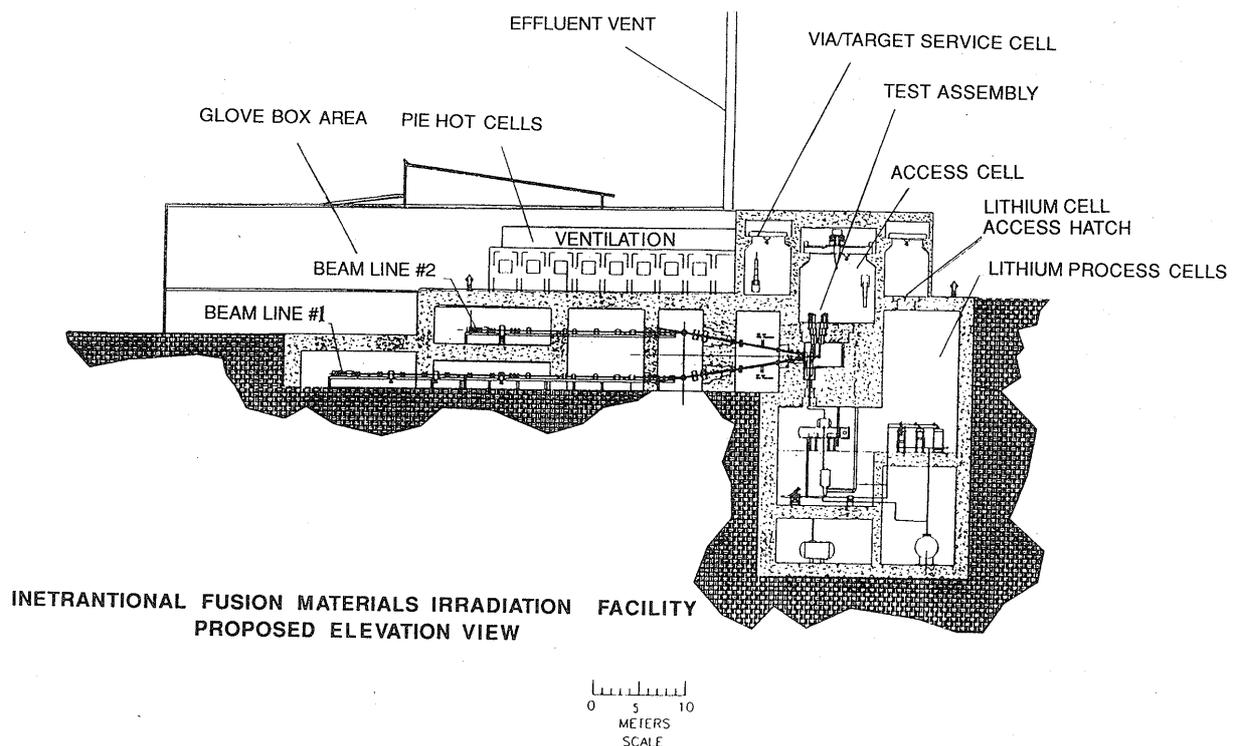


Fig. 5 Current view of IFMIF appeared in the Interim Report of October 1995 [1].

タベースに加えて並ならぬ情熱と努力が必要なことはいうまでもないが、今の所、多国籍の専門家チームの活動は順調なはかどりを見せている。

7. まとめ

- 1) 現実性のある核融合炉材料の開発戦略は、試験手段の要となる強力中性子照射施設の利用を前提にして初めて立案と実行が可能であることを強調した。
- 2) ユーザ活動を先導に、日、米、欧、露共同の概念設計活動が進捗し、最近設計統合作業が行われた。
- 3) 順調に推移すれば、施設は今後約10年以内に利用可能になると期待される。

おわりに

ここに紹介した概念設計の情報は筆者が日本原子力研究所客員研究員として参画している IFMIF-CDA 国際共同作業の最近の成果をもとにした。本稿の執筆にあたり、CDA 参加各機関の専門家、CDA-Sub-Committee、核融合材料研究実施協定 Executive Committee 各位の報告と討論を参考にさせていただいた。ここに謝意と敬意を表する。

参考文献

- [1] Interim IFMIF CDA Report (October, 1995) Oak Ridge, ORNL Publication として印刷中。
- [2] D. G. Doran, IFMIF Working Group Rept., *Proc. IEA Workshop on I. N. S.*, KfK (1992).
- [3] T. Kondo, D. G. Doran, K. Ehrlich and F. W. Wiffen, *J. Nucl. Mater.* **191/194**, 100 (1992).
- [4] A. L. Torego *et al.*, *Nucl. Technol./Fusion* **4**, 695 (1983).
- [5] T. Kondo, H. Ohno, M. Mizumoto and M. Odera, *J. Fusion Energy*, **8**, 229 (1989).
- [6] K. Noda *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **179/181**, 1147 (1991).
- [7] Report of the International Panel on Reviewing ESNIT, March 1993, JAERI.
- [8] T. Kondo, H. Ohno, L. A. Jameson and J. A. Hassberger, *Fusion Eng. and Design* **22**, 117 (1993).
- [9] P. Grand *et al.*, *Nucl. Technol.* **29**, 327 (1976).
- [10] *Proc. IEA Workshop on Technical Planning of IFMIF-CDA*, Sept. (1994) Karlsruhe.
- [11] R. P. Miles *et al.*, Improved Liquid Lithium Target for the FMIT Facility, HEDL-SA2721-F, CONF-82 1103-94 (1982).