

第11回 核融合研究開発基本問題検討会
平成15年9月29日

国際核融合材料照射施設 (IFMIF)計画の概要

東北大学金属材料研究所
日本原子力研究所
松井秀樹

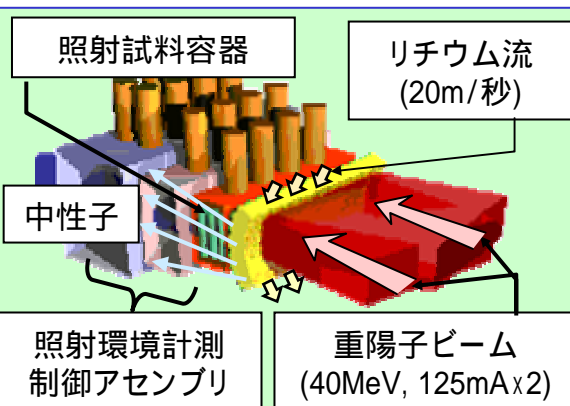
IFMIF の概要

40MeV, 250mAの重陽子ビームを液体Li流に入射して核融合近似の中性子を発生させ、核融合炉材料の重照射試験を実施

主要要求性能

- 照射容積(弾き出し損傷速度)
 - 0.5% ($>20 \text{ dpa}^*/\text{年}$)
 - 6.0% ($>1 \text{ dpa}/\text{年}$)
 - 7.5% ($>0.1 \text{ dpa}/\text{年}$)
- 稼働率 70%

dpa: 原子当たりの弾き出し回数
(20dpa: $\sim 2 \text{ MW}/\text{m}^2 \times 1 \text{ 年}$ に相当)



テストセル施設

核融合炉照射条件下での材料性能の工学実証データを取得

重陽子線形加速器

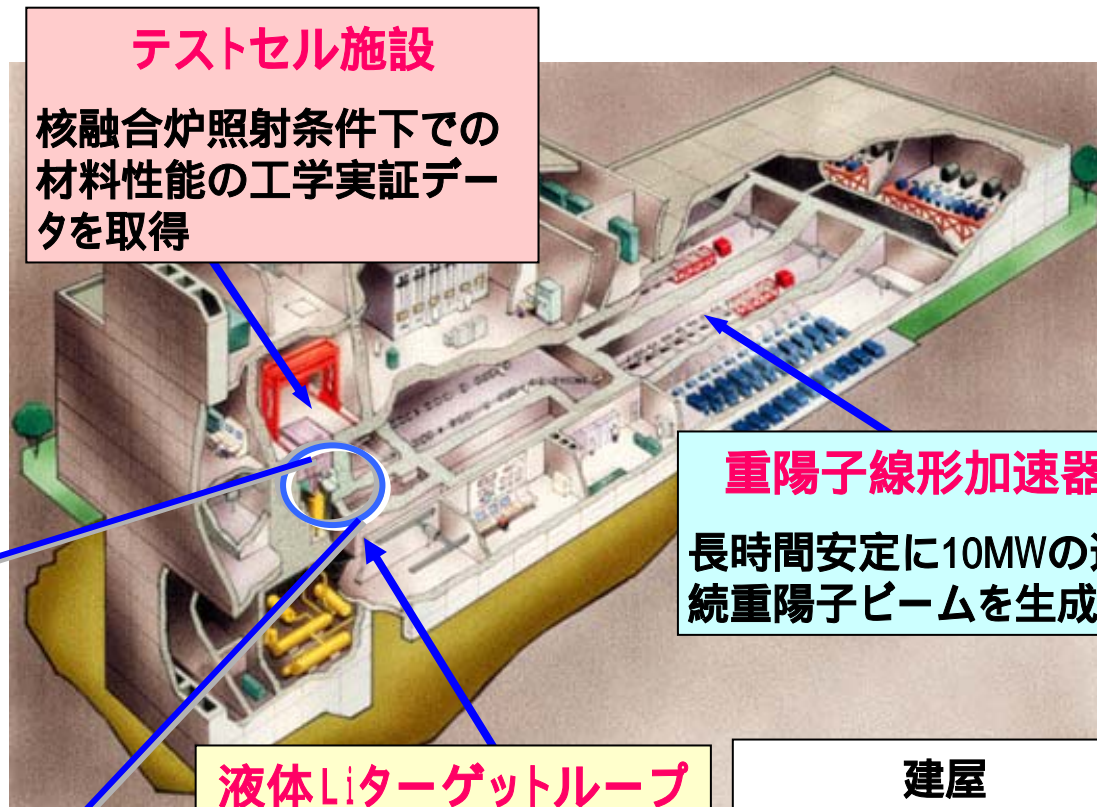
長時間安定に10MWの連続重陽子ビームを生成

液体Liターゲットループ

1GW/m²のビーム入熱に耐えて大量の核融合中性子を発生

建屋

敷地面170m x 60m
地上26m、地下11m

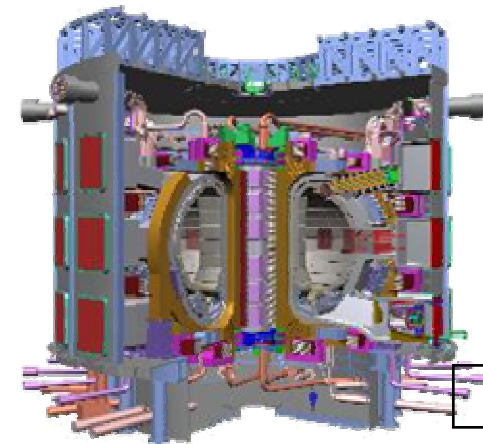


IFMIFの必要性

-ITER との関係-

ITER

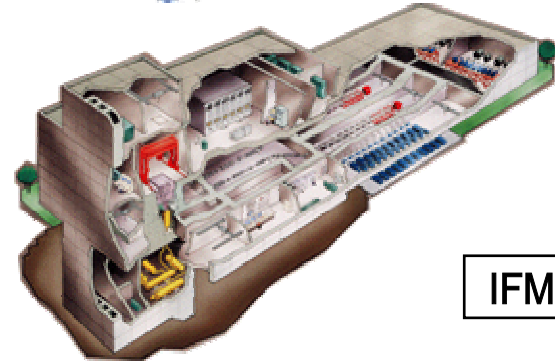
- 炉心プラズマ技術:
核燃焼プラズマ、長時間燃焼の実証
- 炉工学技術:
超伝導コイル、プラズマ対向機器製作、
遮蔽、加熱、トリチウム取扱、遠隔保守
技術等の統合技術の確立



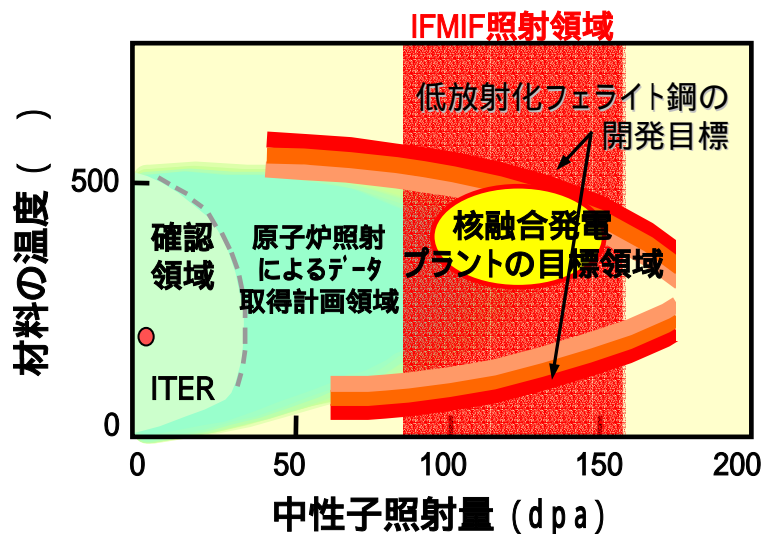
ITER

IFMIF

- 発電実証プラント建設のための材料試験
設計・許認可に必要な第一壁・ブランケット構
造材料等の14MeV中性子の重照射材料特性
データベースの構築



IFMIF



ITERで残された課題は発電ブランケット開発



ITERでのテストブランケットの試験に加え、
IFMIFでの中性子重照射データ構築が不可欠

必要要件

核融合炉材料の試験には、核融合条件下の弾き出し損傷と、中性子によるヘリウム生成等核変換の影響を同時に模擬することが重要。

IFMIFの任務

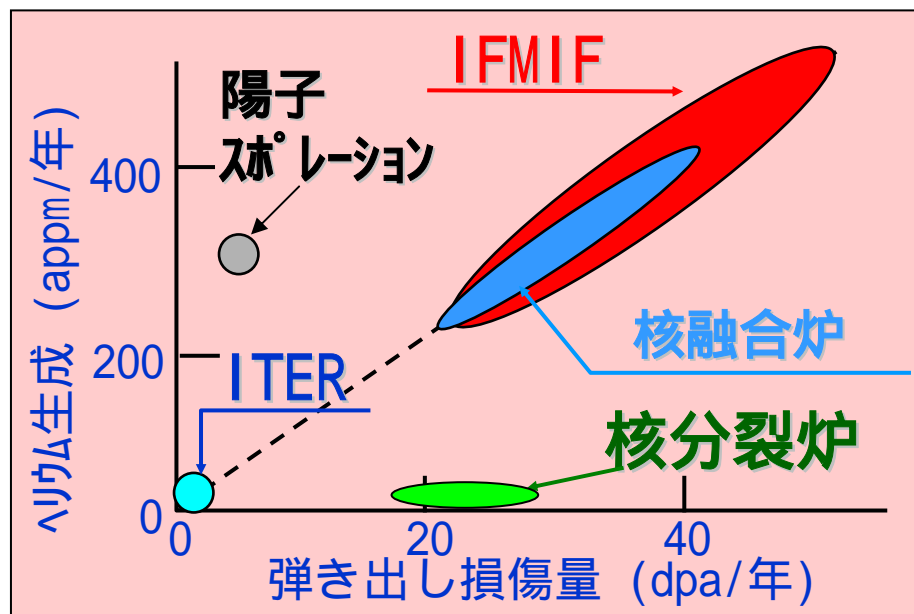
核融合実証炉の寿命相当の照射量までの照射試験を実施するに十分な強度の核融合近似スペクトルの中性子を十分な大きさの試料容積に提供すること。

- 実証炉の設計・許認可に必要な工学データの取得

他の照射源との比較

これまで検討された中でIFMIF以外の照射装置では、現実的な時間内に核融合炉環境を模擬した重照射が達成できない。

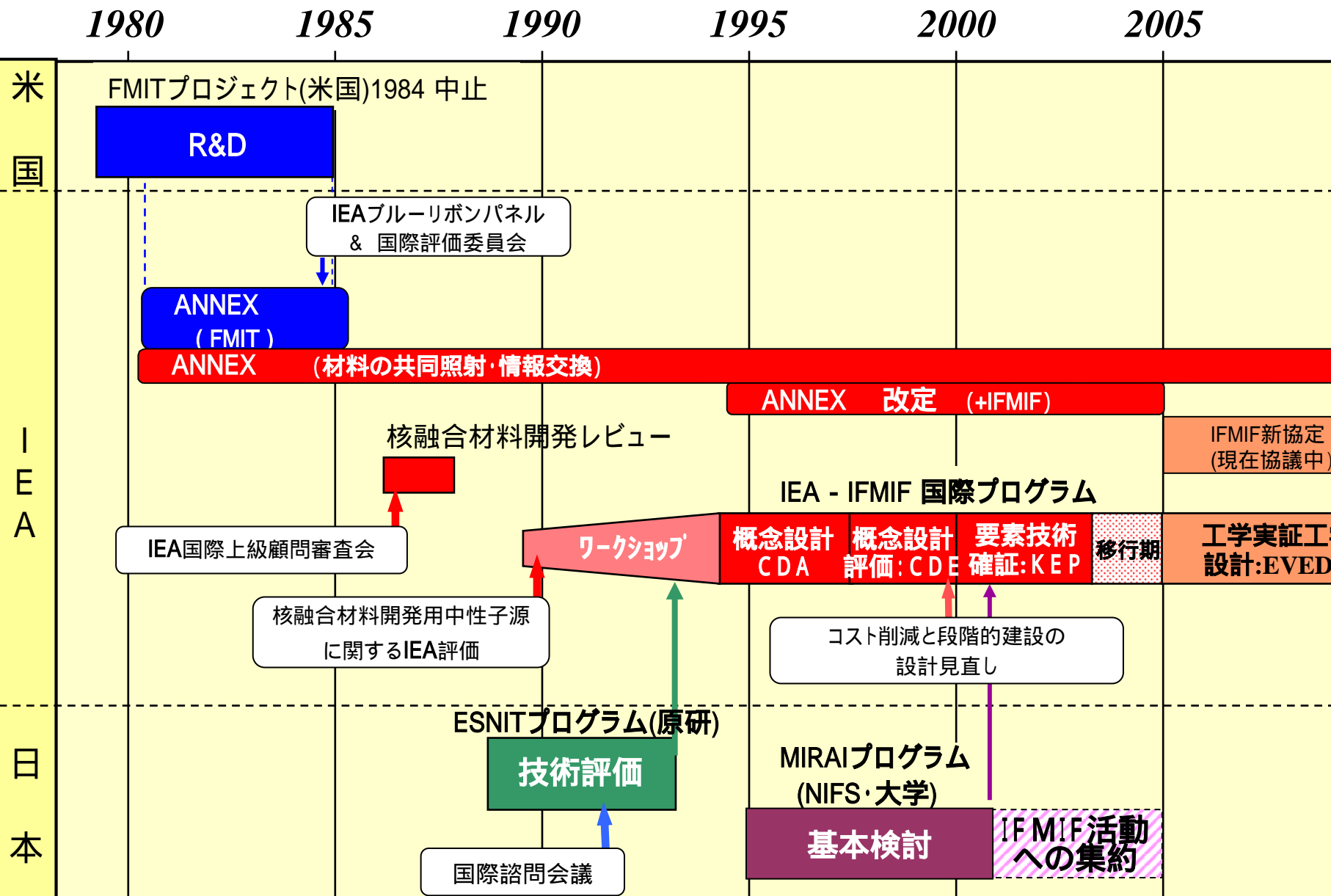
核融合中性子重照射に耐える低放射化構造材料等の開発



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)

核融合材料用中性子源開発の経緯



核融合材料用中性子源開発における我国の方針

原子力委員会「第三段階核融合研究開発基本計画」(H4.6策定)

- ・核融合炉に必要な長期的研究開発として「高いフルエンスの中性子照射に耐える構造材料…及び低放射化材料の開発を進めるとともに、中性子照射による材料特性等のデータの蓄積を進めることとしている。

原子力委員会核融合会議

「中期的展望に立った核融合炉第一壁構造材料の開発の進め方について」(H12.5策定)

- ・「照射試験施設は核融合炉材料の開発において中核となる試験施設」であり、
「高エネルギー中性子照射施設については適切な時期までに建設することが不可欠」
「原研は、国際協力の下で進められているIFMIF計画については、参加各国との調整を図りつつ、大学等国内関係機関と緊密な連携協力のもとで推進を図る」と結論している。

総合科学技術会議「ITER計画について」(H14.5決定)

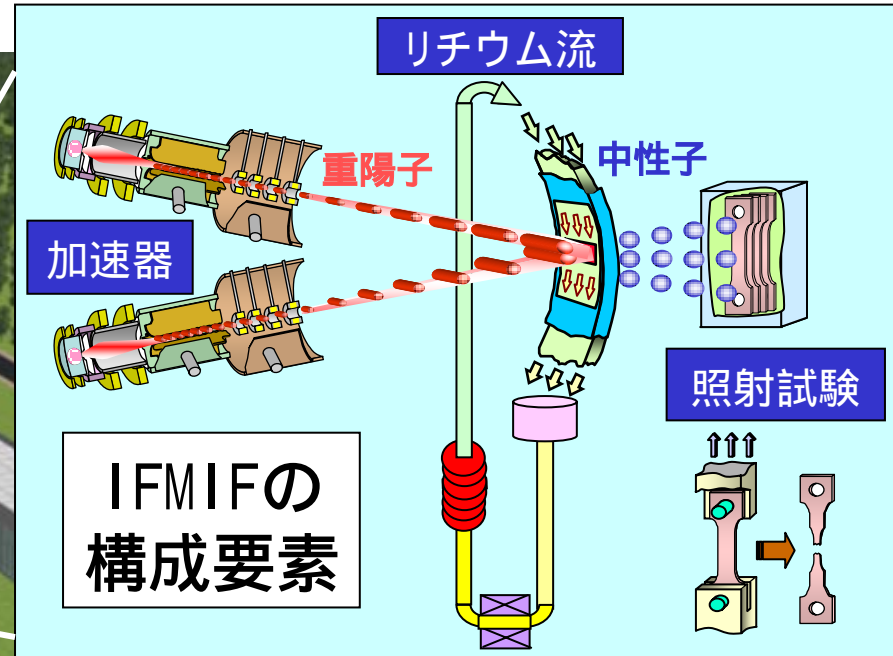
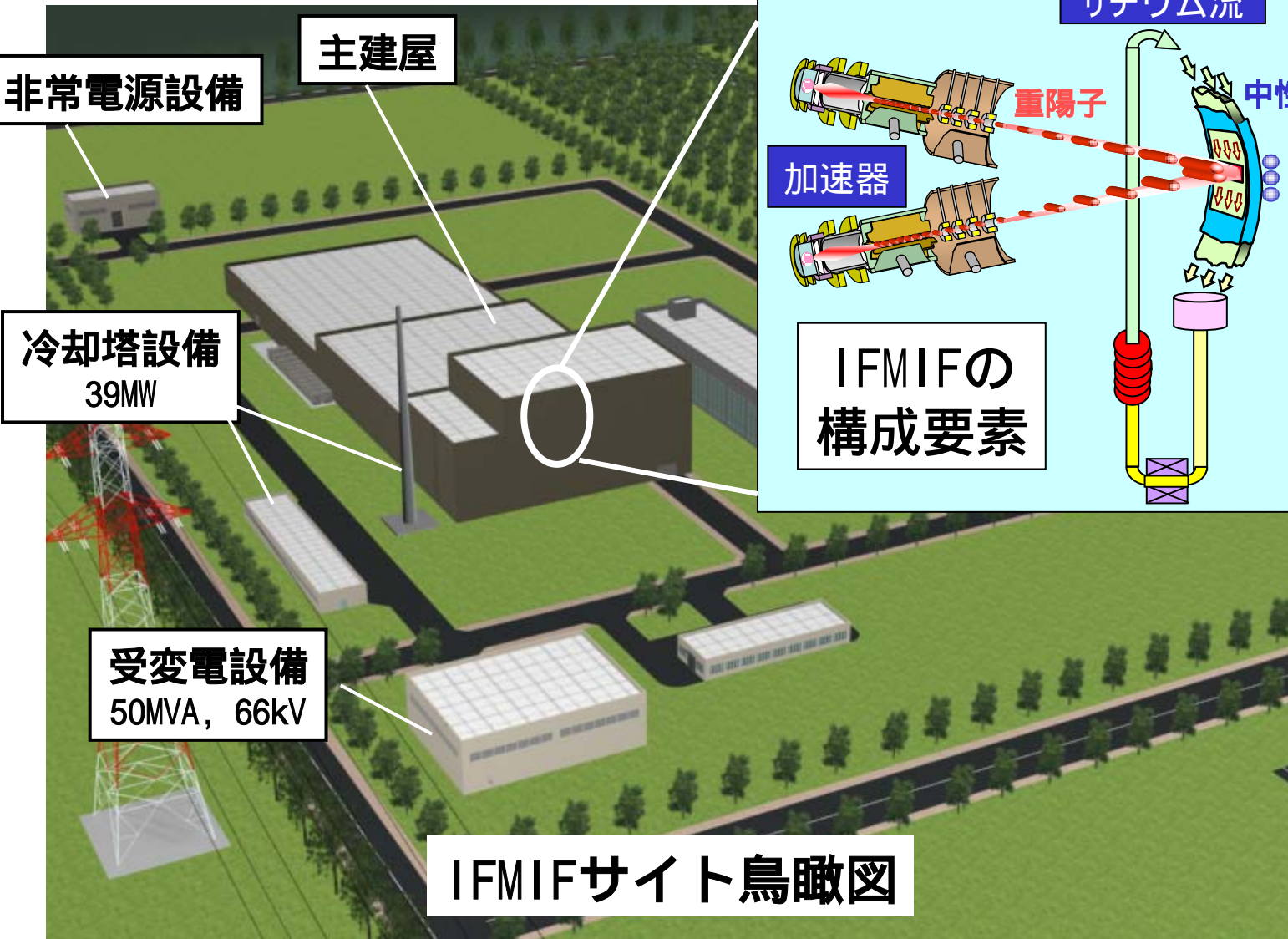
- ・「ITER計画の実施に合わせ、(中略)、材料開発を目指した国際共同研究計画が具体化する可能性があること」が留意事項として上げられている。

科学技術・学術審議会 学術分科会 基本問題特別委員会 核融合研究ワーキンググループ

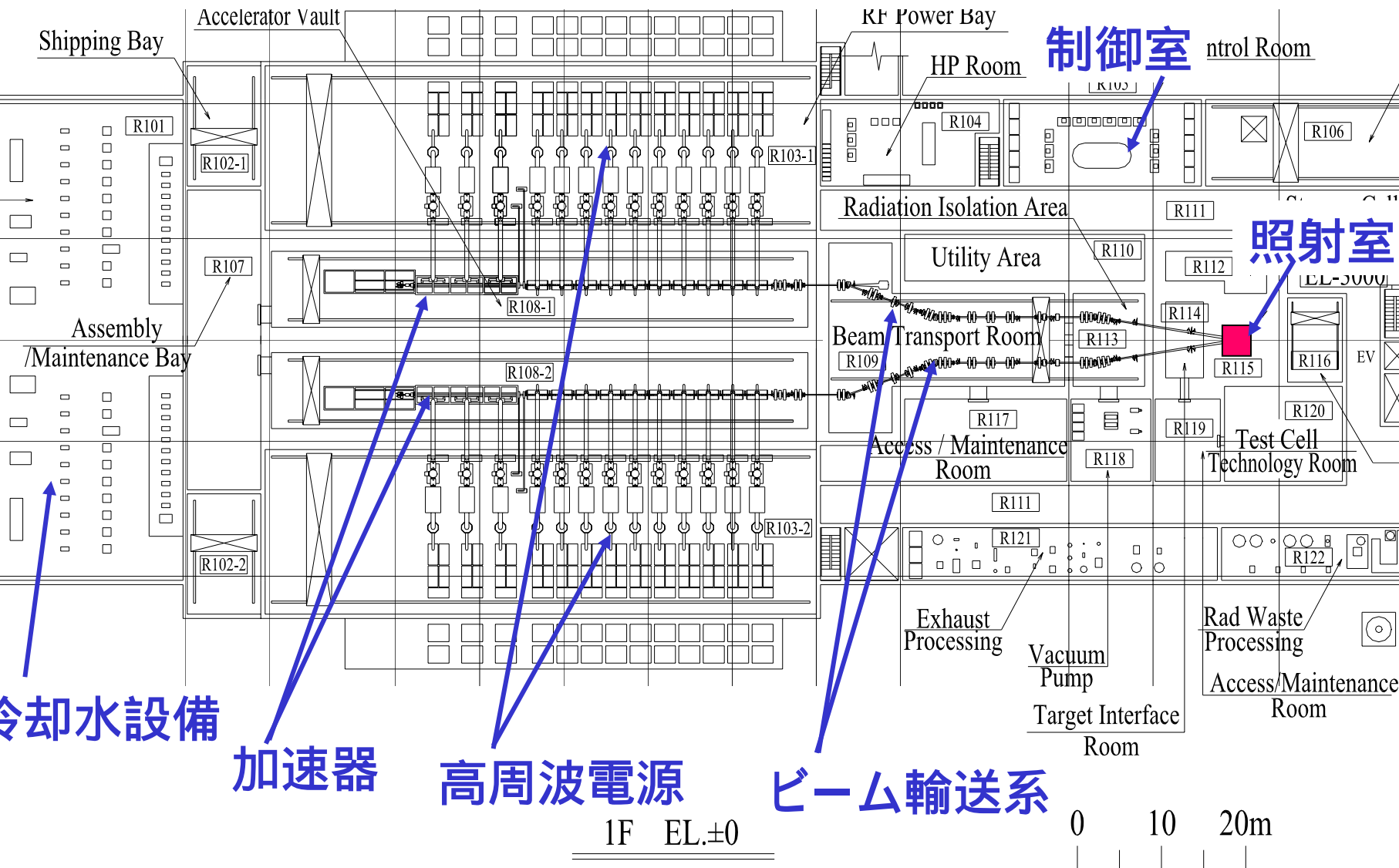
「今後の我が国の核融合研究の在り方について」(H15.1報告)

- ・「材料・ブランケット開発はプラズマ閉込め方式に拘わらず必須の課題。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ためには国際協力による核融合材料試験装置(IFMIF)計画が不可欠」、「工学実証・工学設計活動に速やかに着手する必要がある」
「原研/新法人については、(中略)、炉工学分野では、核融合材料照射試験装置計画を大学等との連携の下で推進する役割、……が求められる」と結論されている。

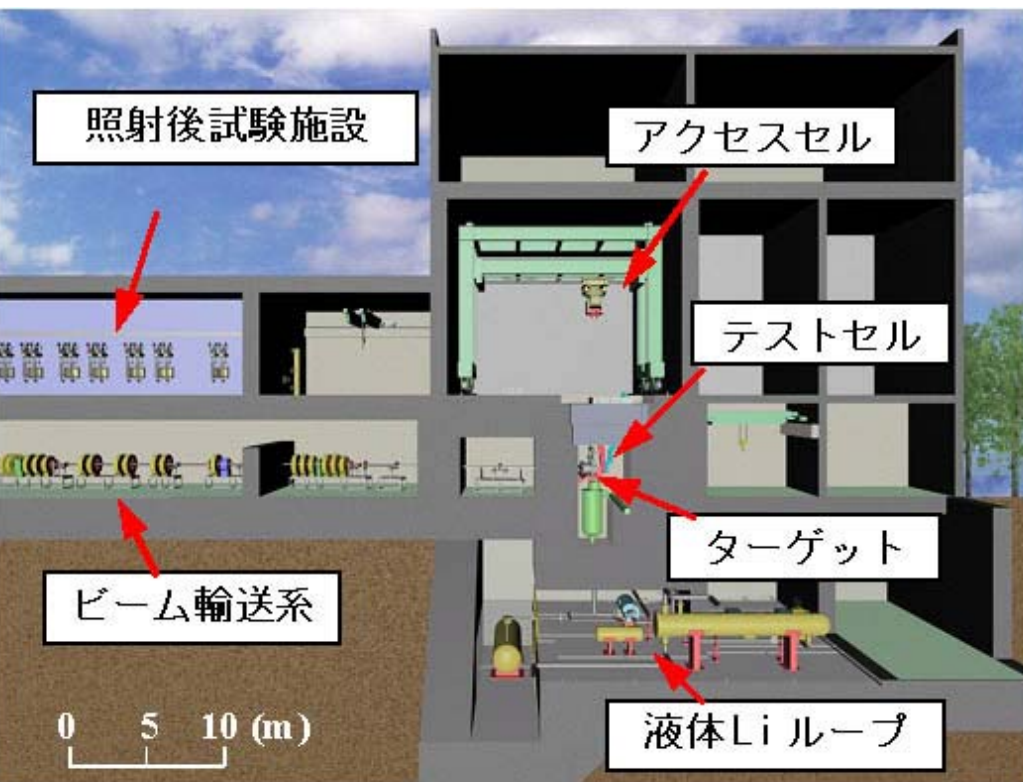
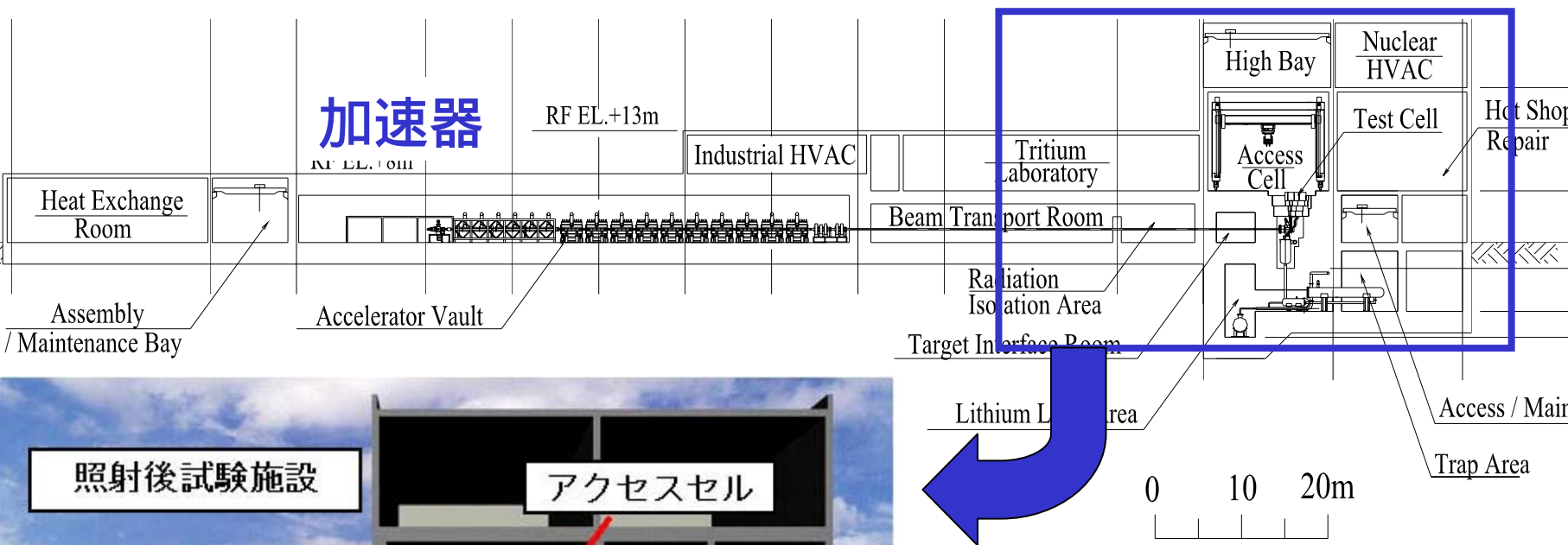
IFMIF システム設計の概要



IFMIF施設の1階平面図



IFMIF施設の側断面図



照射試験施設・液体リチウム施設拡大図

IFMIF加速器の概要

高周波源システム

CW、175MHz、1MW出力、13モジュール
最終段にダイアクロード使用

高エネルギービーム輸送 (HEBT)

ビームフットプリント 幅 20cm x 高 5cm、
多極磁場テレスコープ方式

ドリフトチューブリニャック (DTL)

CW、175MHz、アルバレ型、28.9m、40MeV
10タンク

マッチングセクション (RFQ)

CW、175MHz、バンチャー空洞、四重極磁石
全長0.66m

高周波四重極加速器 (RFQ)

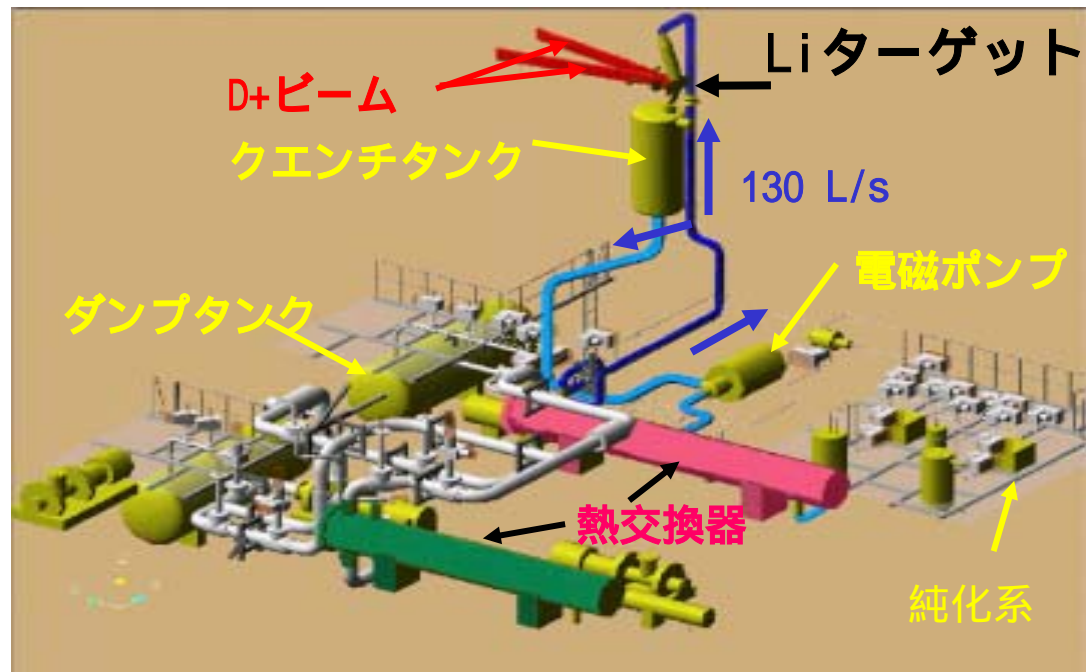
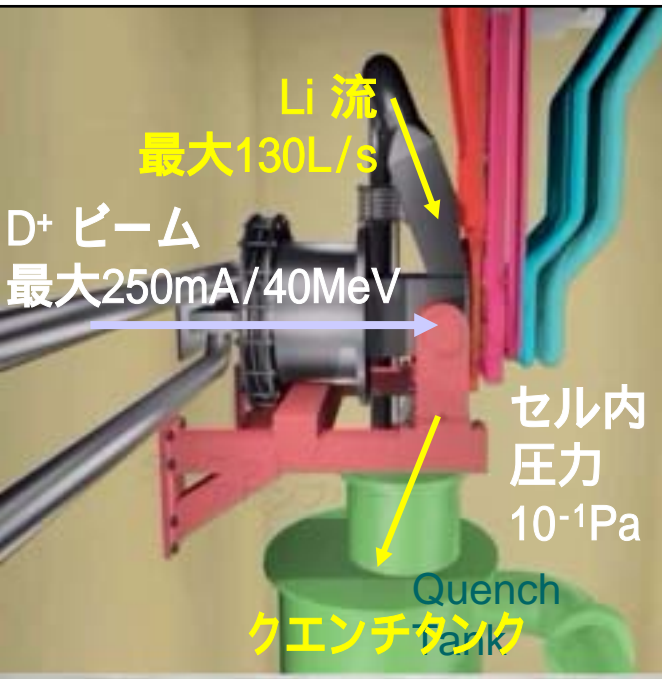
CW、175MHz、4ベーン型、全長12.5m、5MeV
結合空洞方式、銅ろう接構造 - 水冷却

イオン入射器

ECR型、155mA D⁺、100keV、エミッタンス 0.2 mm mrad (規格化)、
ソレノイド方式ビーム輸送

IFMIFターゲット/Liループの概要

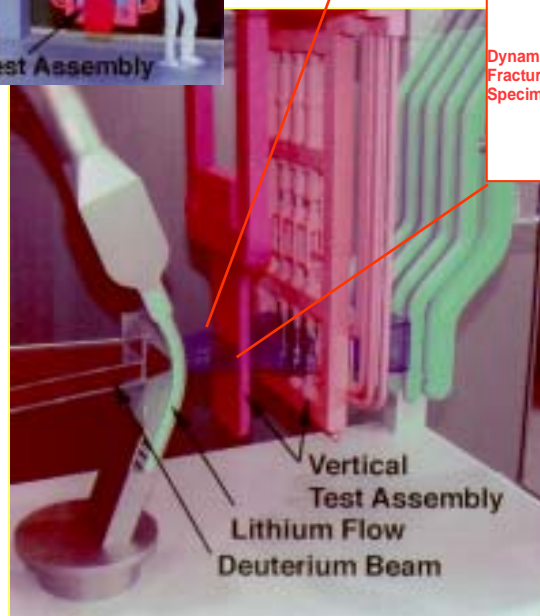
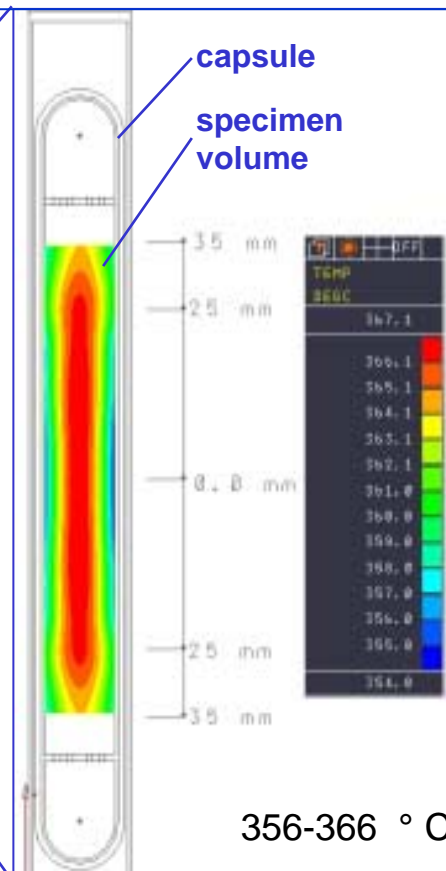
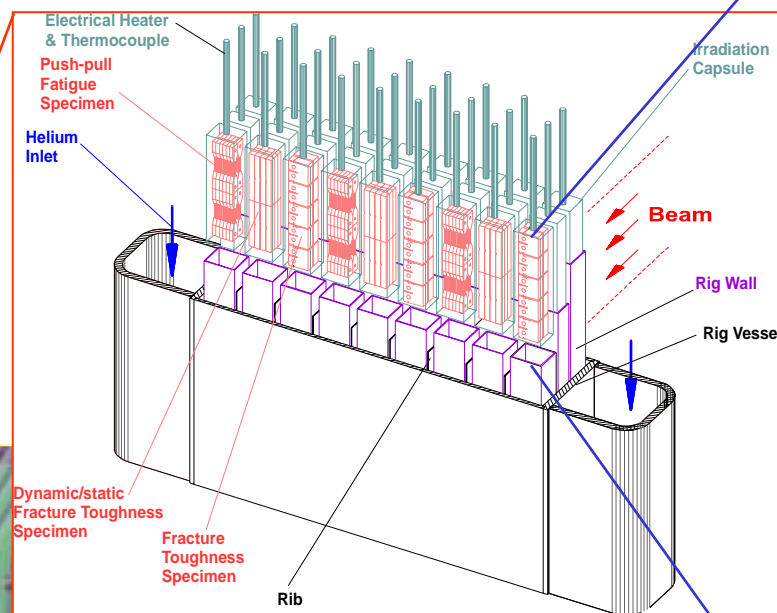
窓なし(自由表面)Liターゲット



主要な仕様

- 入熱量: 10MW/100 cm²
- Li流速: 平均15 m/s (10-20m/sの範囲で制御)
- ノズル形状: 幅26cm/ 厚2.5 cm (ビームサイズ幅20cm)
- Li温度: ノズル入口 250 , 出口 300 , 最大450
- トリチウム生成量: 7 g/年
- 不純物濃度許容値: 10 wppm (C, N, Oそれぞれにつき)

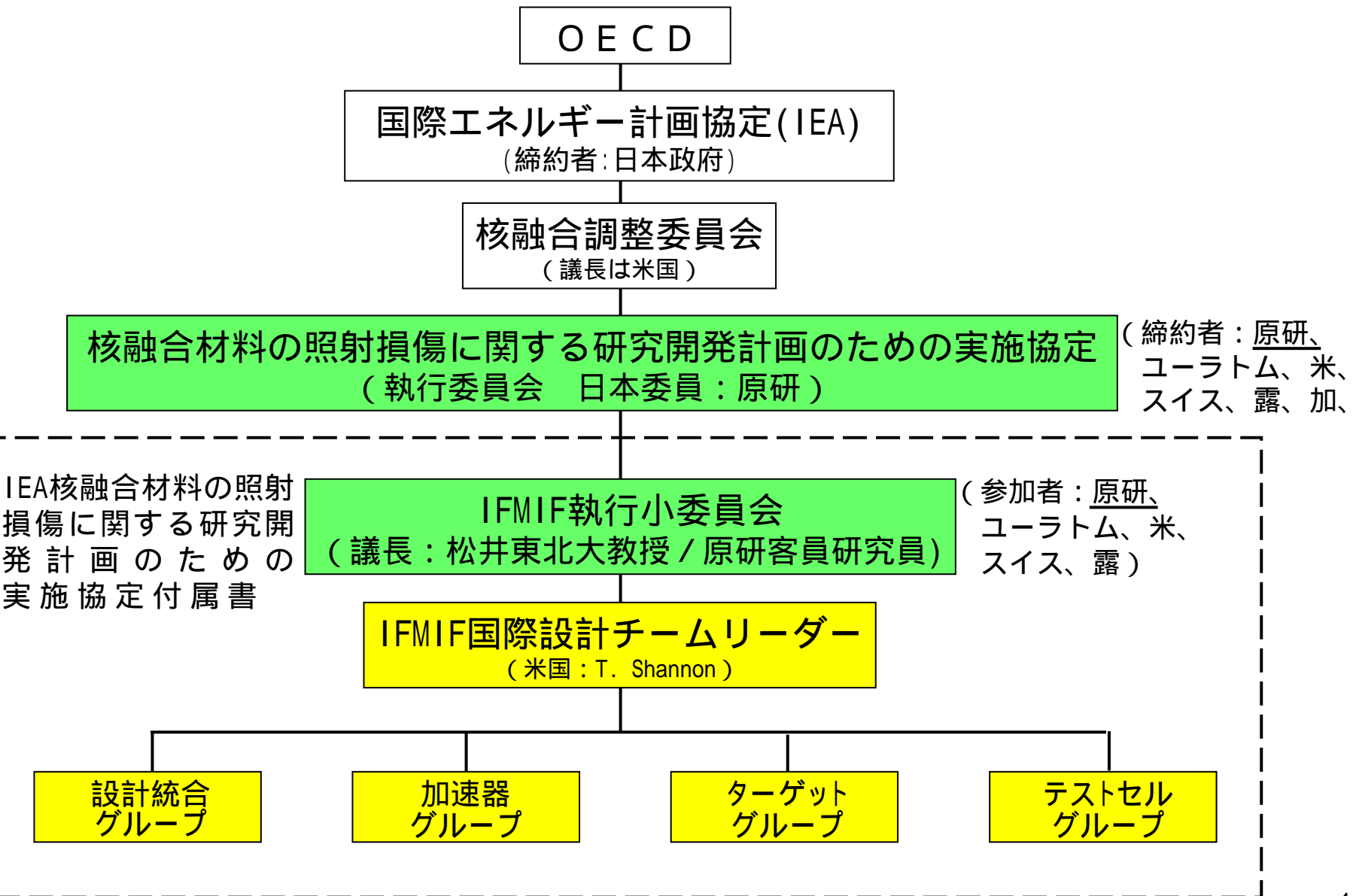
IFMIFテストセルの概要



主要な照射条件(高中性子束テストモジュール)

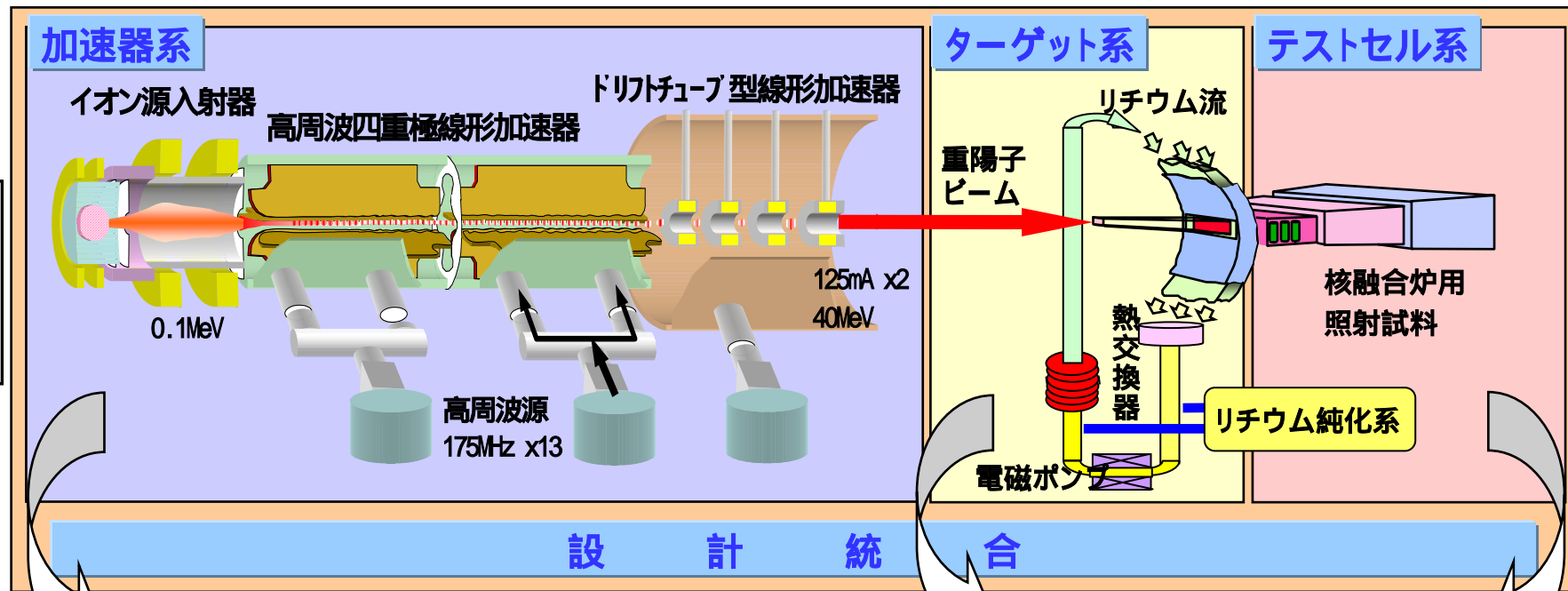
- フェライト・マルテンサイト(ODS)鋼	250-650	150 dpa
- バナジウム合金	350-650	150 dpa
- SiC/SiC複合材	600-1100	150 dpa
- W合金等の耐高温金属材料	650-1100	80 dpa
- 接合材料・ジョイント	650-1100	80 dpa

要素技術確証活動(KEP)の体制



要素技術確証活動(KEP)の成果

構成概念



主要成果

- ・ECR型を標準イオン源に決定。1000時間試験に成功。
- ・1MW 連続の高周波源で1000時間試験に成功

- ・IFMIFモデルのノズルによる液体Li流動試験成功。
- ・窒素ゲッタ材開発により<10ppmの達成見通し。

- ・高中性子束照射モジュールの熱流動解析、試片温度制御試験結果を設計に反映。
- ・核データ整備、微小試験片技術拡充。

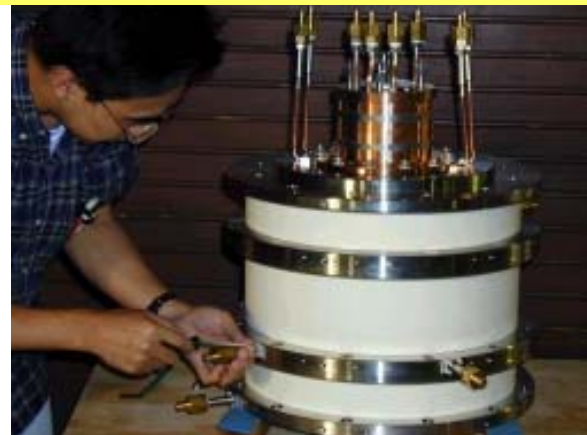
IFMIF イオン源の開発

アーク放電(ARC)型とECRイオン源のビーム特性について、同一条件下で性能を比較、ECR型を標準イオン源に決定。

IFMIFイオン源の性能目標

方式	ARC or ECR
イオン種	D+
エネルギー	100 keV
電流	155 mA (200 mA H+)
組成比	D+ > 90 %
ビームノイズ	$\pm 1 \%$
63%規格化エミタンス	0.2 mm mrad
90% 規格化エミタンス	1 mm mrad
デューティー	CW
寿命	300 h – 1000 h

アーク放電(ARC)型イオン源



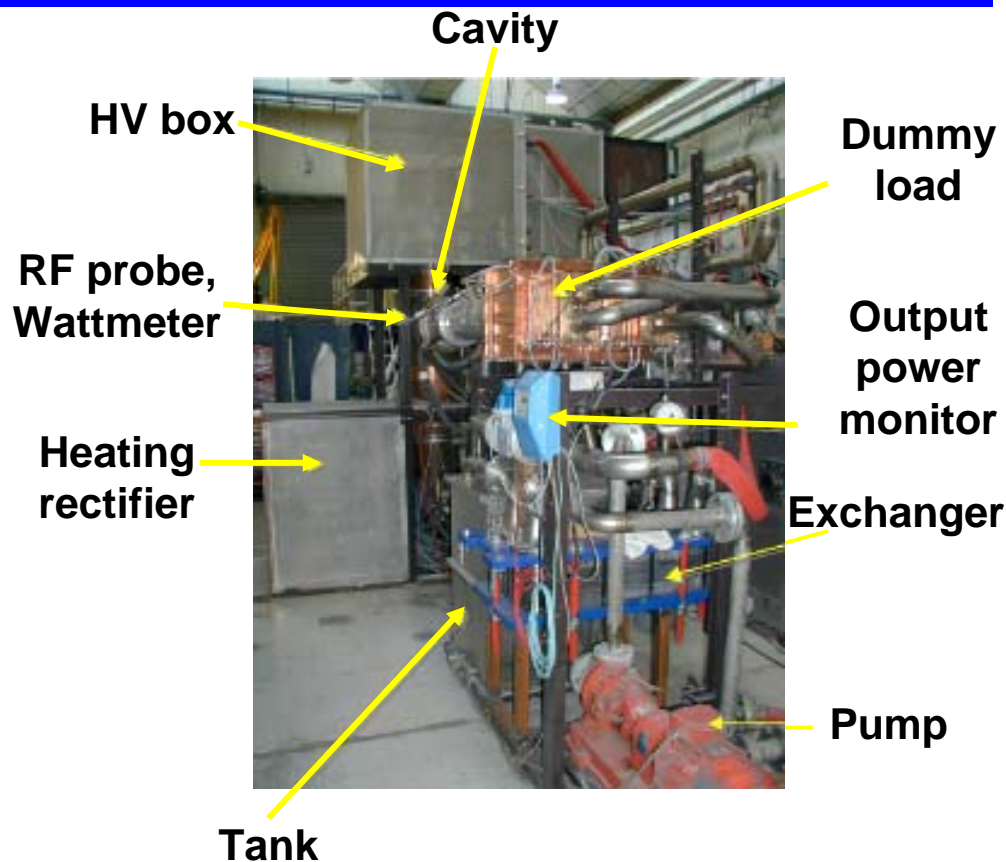
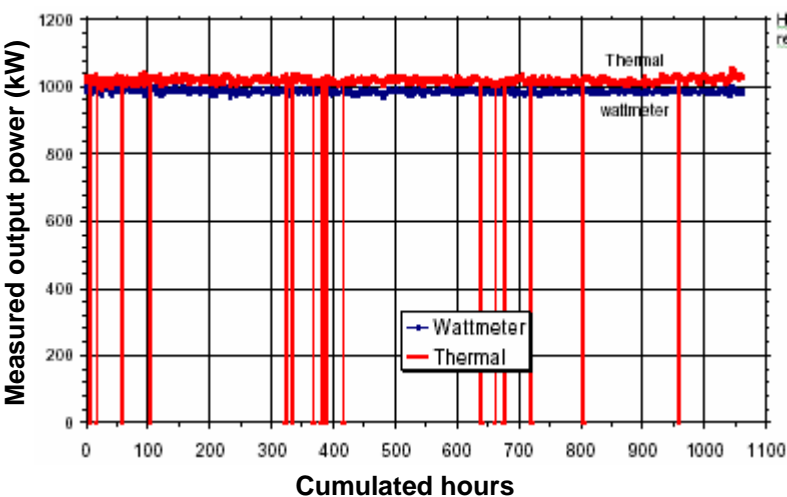
マイクロ波(ECR)イオン源



IFMIF 高周波源

ターレス TH628 ダイアクロードの連続運転試験を実施、延べ1千時間の運転実績を達成。

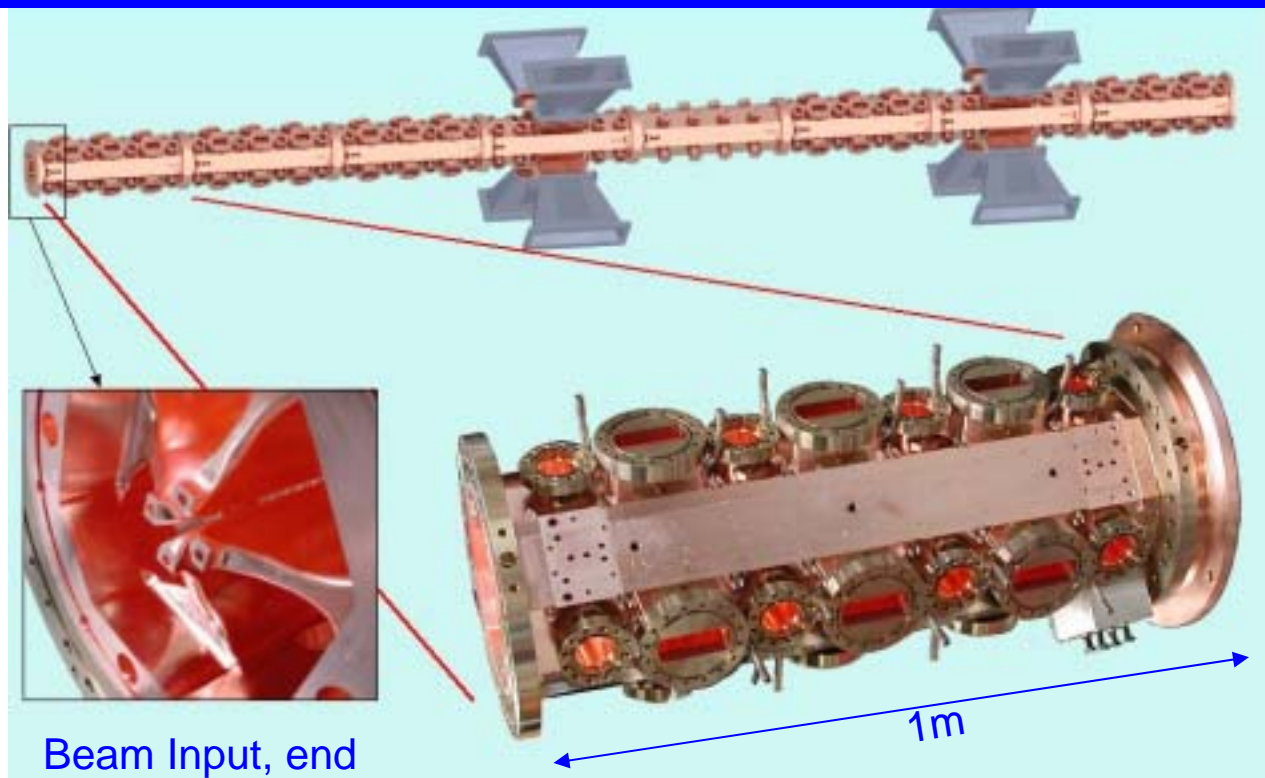
- 1 MW RF output at 200 MHz
- 1061 hours test; 1047 RF hours
- 98.66 % on, 1.3% off
- MTBF: 52 h



IFMIF 高周波四重極加速器 (RFQ)

コールドモデル製作試験を実施、サクレーではIPHI-350MHzモデルを、原研では175MHz-4mモジュールを製作。

RFQ cold model,
(IPHI, CEA Sacley)



RFQ

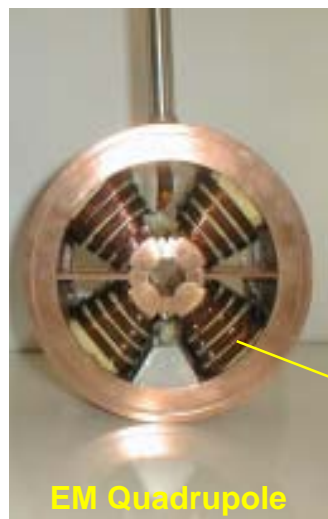
(CEA Sacley)

- RFQ beam dynamics is finished
- Beam emittance optimized for DTL, meets 125mA goal

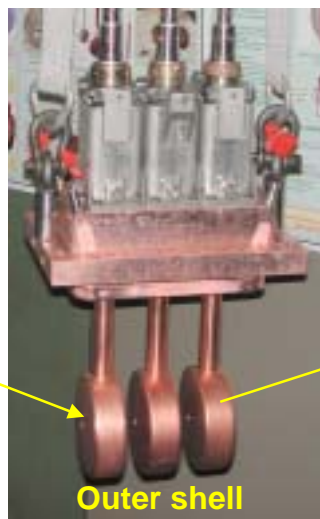
(LANL) - Long term experience at cw 100 mA H⁺ 6.7 MeV

IFMIF ドリフトチューブリニアック (DTL)

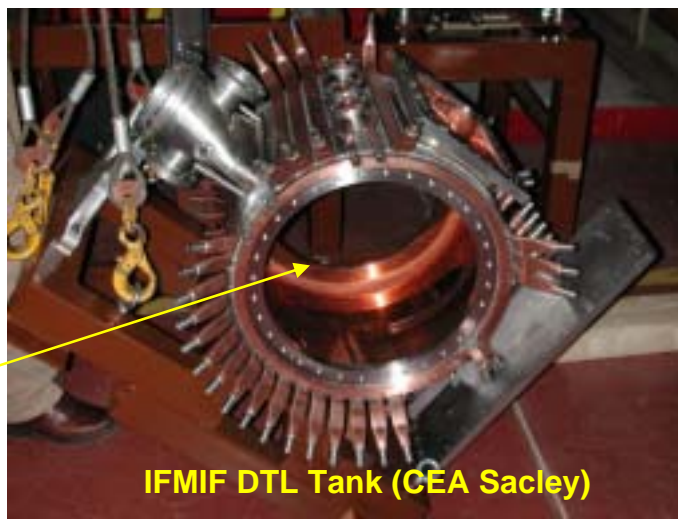
サクレでIPHI-350MHzモデルを用いた、製作試験を実施。
ビーム・ダイナミクス・シミュレーション計算評価精度の向上。



EM Quadrupole



Outer shell



IFMIF DTL Tank (CEA Sacley)



Instrumented
DTL Tank

Comprehensive particle dynamics calculations from 5 to 40 MeV finished

→ full transmission

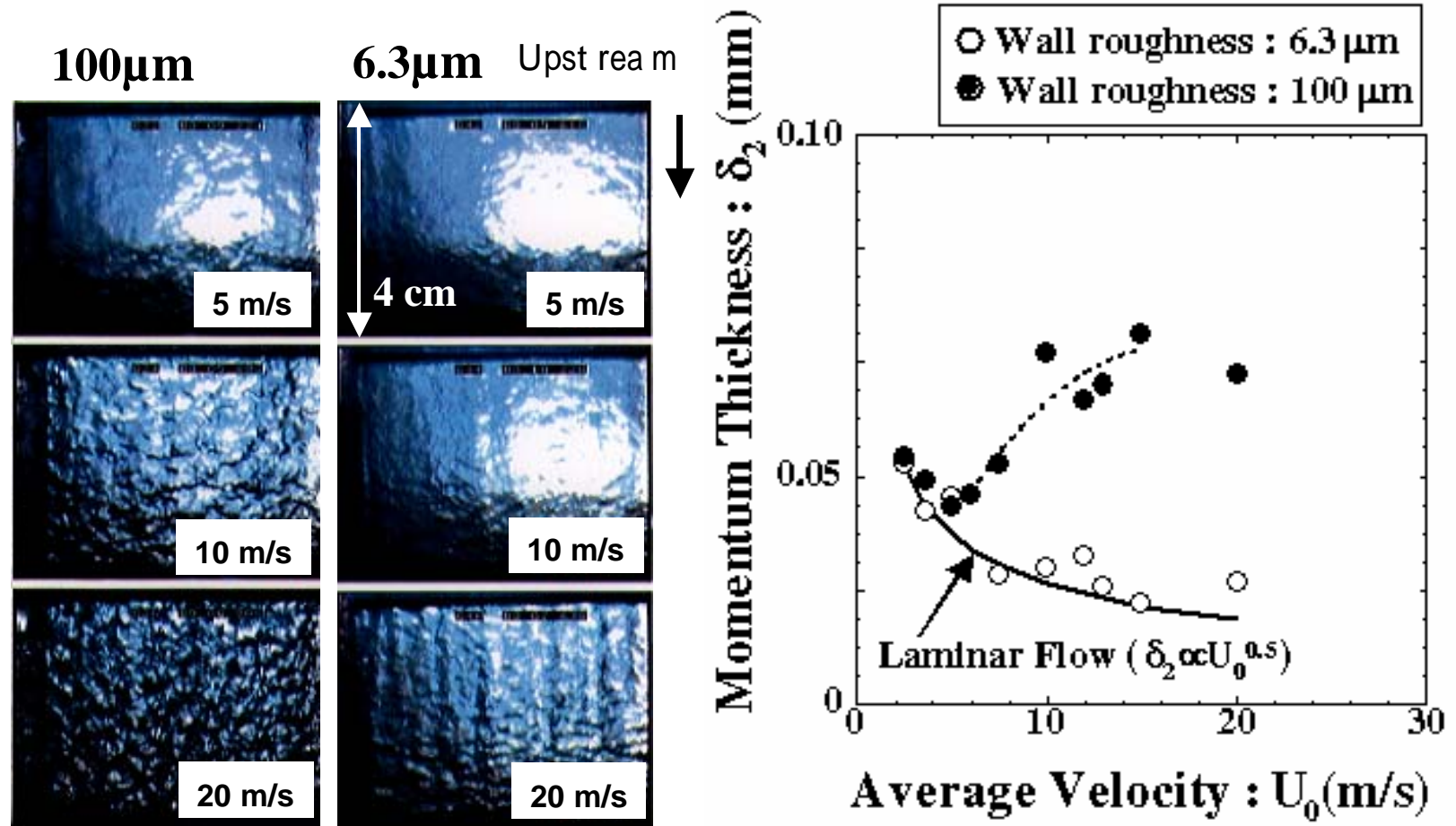
Beam dynamics design released

Same calculations done for SC alternative

→ lower rf losses, shorter linac, larger aperture

IFMIFターゲットノズル水噴流実験

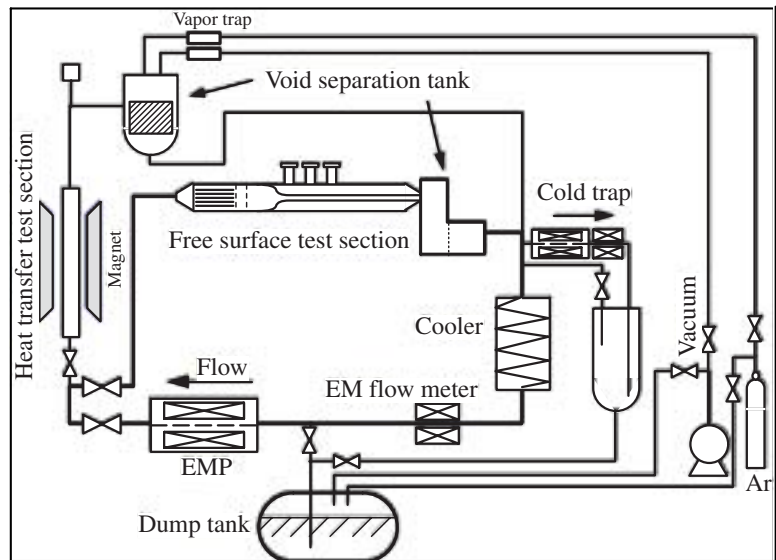
秒速20m/sまでの水噴流実験で、安定な自由液面流を実証。
波高は、1 mm以下。ノズル表面粗さは、6mmと決定。



Li ループ実験

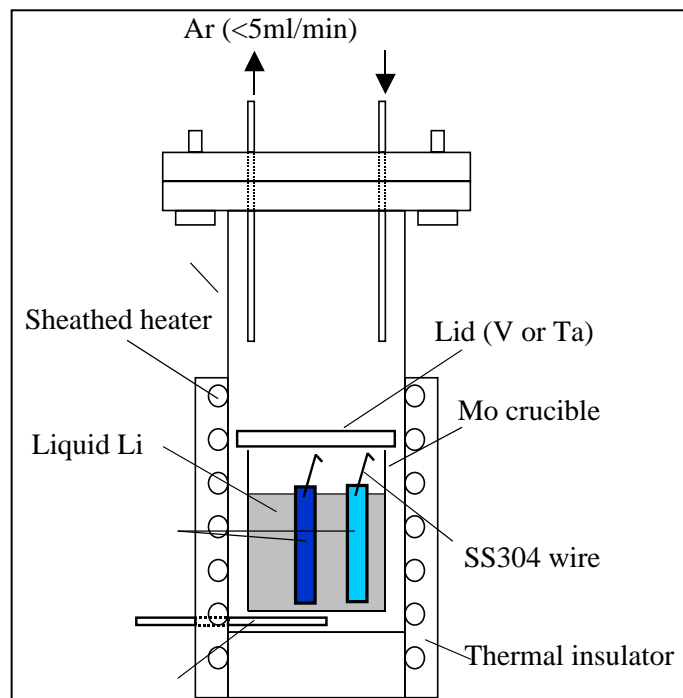
0.15 MPaのArカバーガス雰囲気で、秒速14m/sの安定な自由液面流を実証。

Li流幅: 7 cm
Li流圧さ: 1 cm

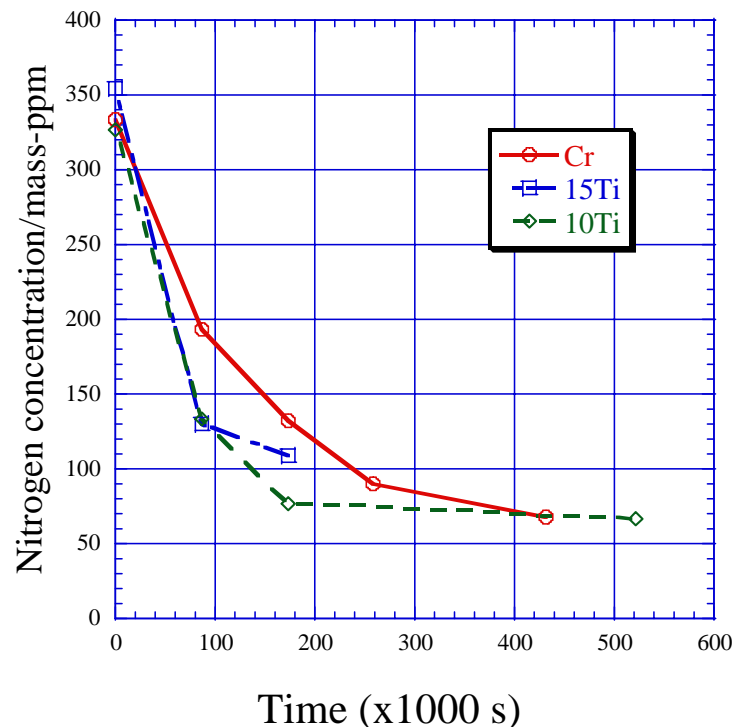


Li 中の窒素不純物制御

Li中の不純物制御材として、Cr,V-Ti合金の特性を測定。
Crは、複合窒化物の特性から、65ppmが限界。
高濃度窒素領域ではCr,低濃度領域ではV-Ti合金で制御。



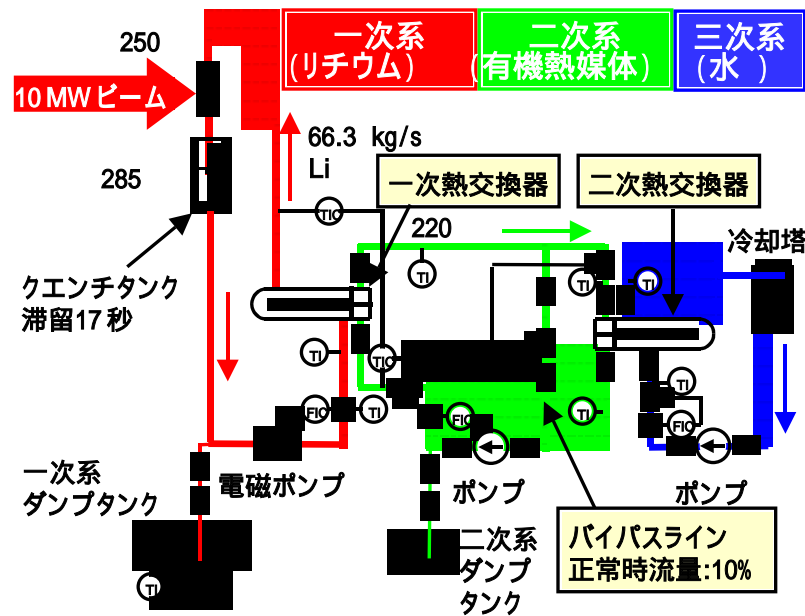
Li中窒素不純物制御の実験装置



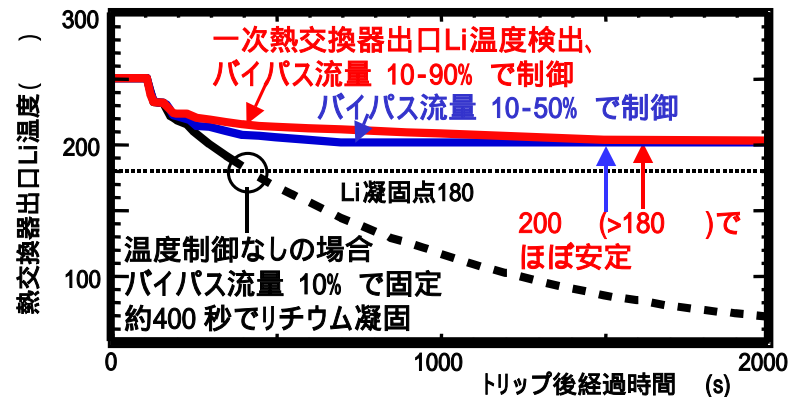
Li中窒素不純物の過渡変化
(Cr, V-10%Ti, V-15%Ti)

Liループ温度過渡特性

二次系バイパス流量制御により、長時間のビームトリップ時でも、Li凝固は起こらず、ループ停止不要で稼働率の向上。



解析対象モデル(250 mA 正常運転時)

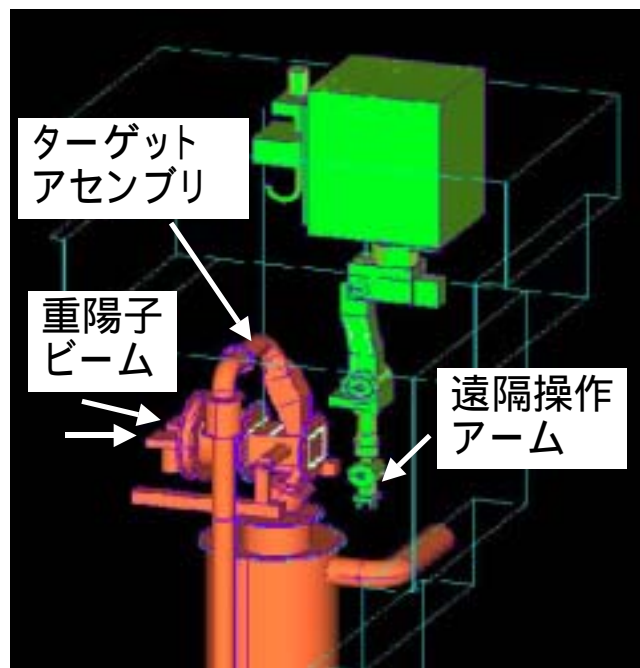


ビームトリップ後の Li温度 (250 mA 0mA の場合)

左図：解析モデル
右上図：過渡解析結果

ターゲットアセンブリ遠隔操作交換

ターゲットアセンブリと背面壁の遠隔操作概念設計を実施し、
基本概念を構築



ターゲットアセンブリと
遠隔操作アーム



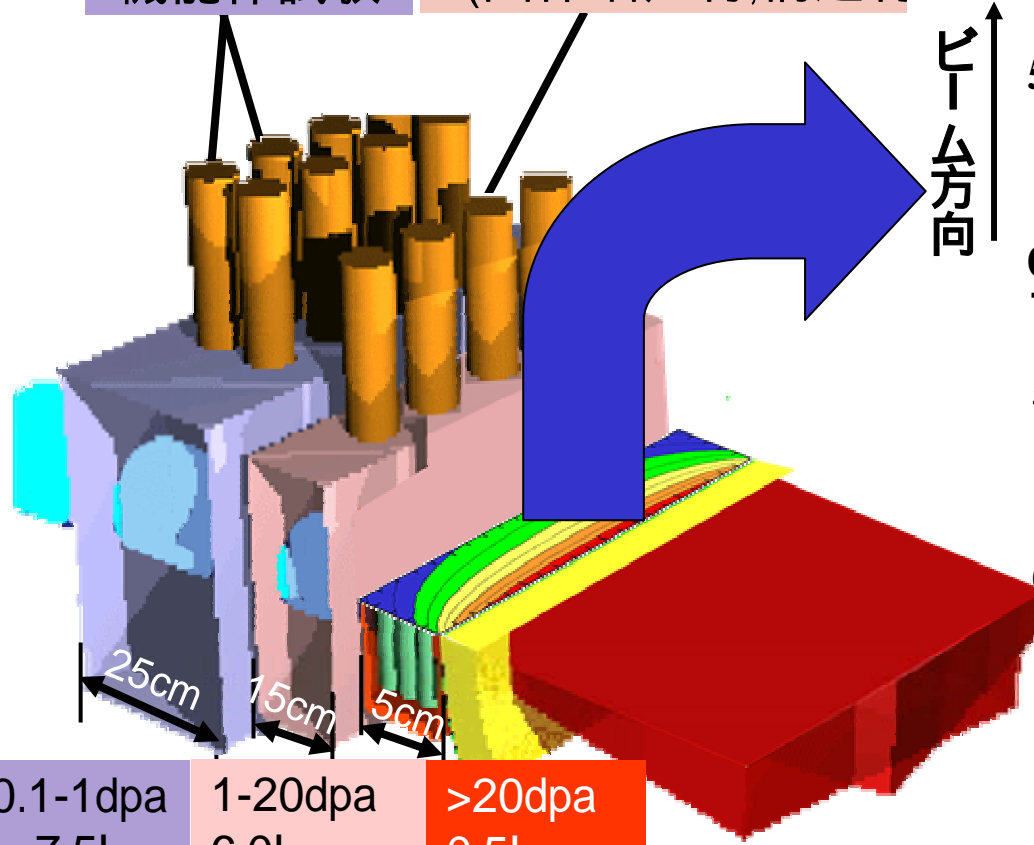
交換型背面壁の遠隔操作実験

高中性子束領域の中性子束分布評価

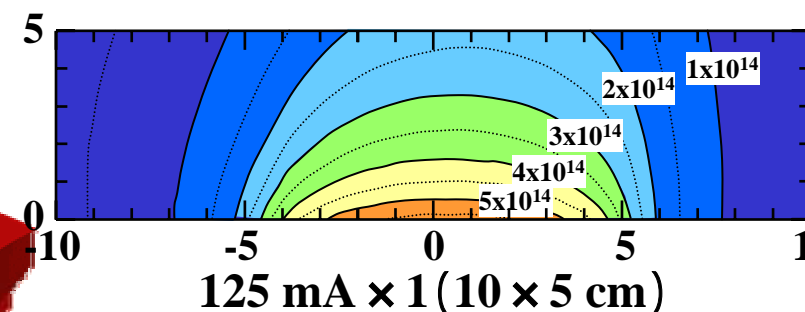
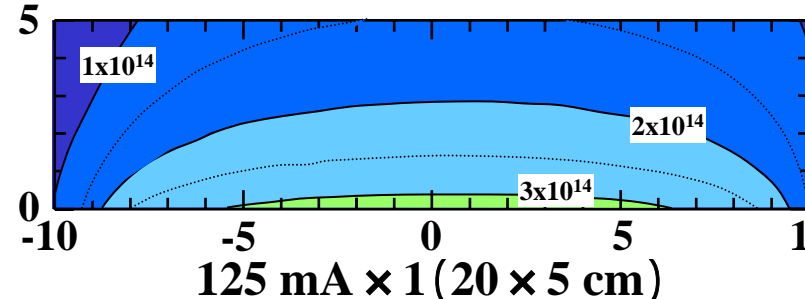
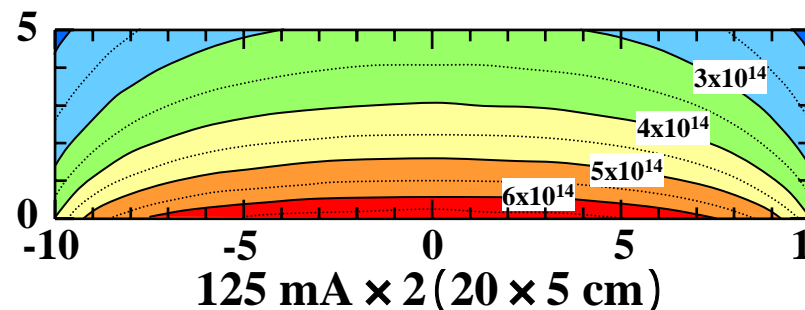
ビーム時、ビーム幅を半分にするにより、照射体積は約半分になるが、2ビーム時とほぼ同一の中性子束が得られる

ブランケット
機能体試験

その場試験
(固体増殖材, 構造材)



ビーム方向



水平方向 (cm)

中性子束分布 ($\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$)

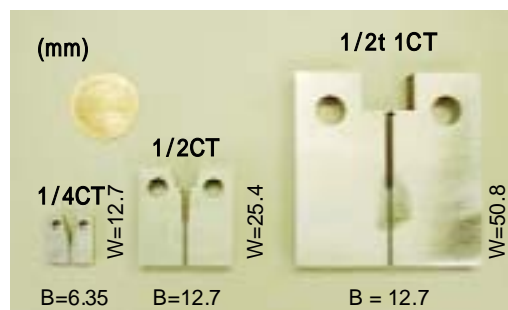
Fe 50% + Void 50%

dpa値は1年当たり

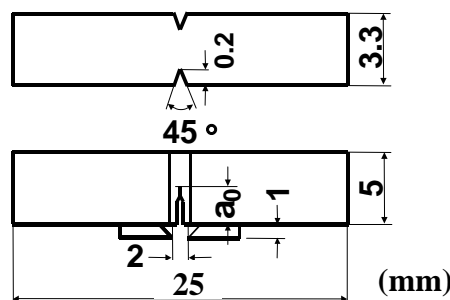
微小試験片技術(破壊靱性試験)

照射スペースを最大限に活用し、中性子束や温度の不均一性を最小限にするため、特に破壊靱性試験片の微小化が不可欠

微小なCT試験片および3点曲げ試験片を用いて、低放射化フェライト鋼の破壊靱性に及ぼす寸法効果を確認



CT試験片



3点曲げ試験片

微小試験片の現状

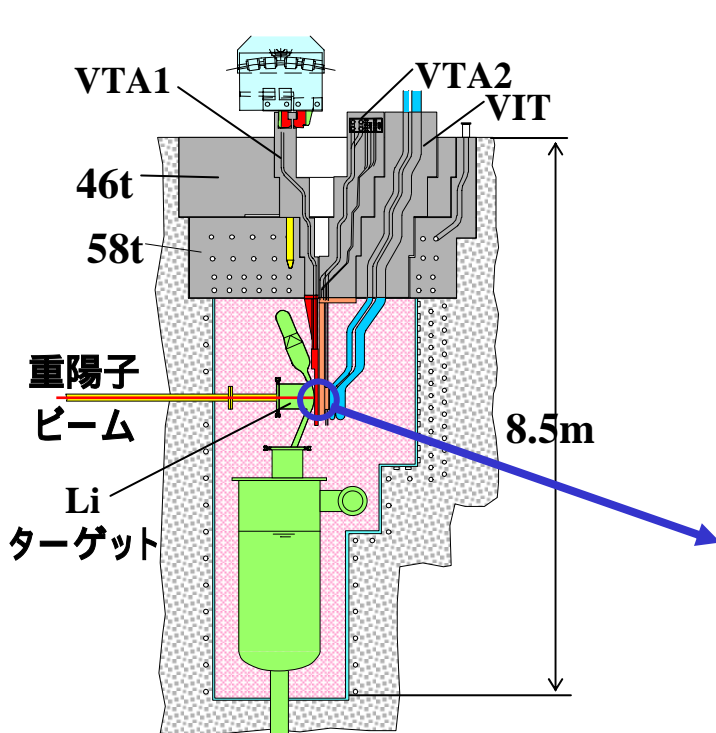
種 類	形状・寸法	現 状
引 張		開発済
疲 労		開発済
曲げ / 衝撃		ほぼ開発済
クリープ		実証必要
疲労亀裂進展		R & D中
破壊靱性		R & D中

10 mm

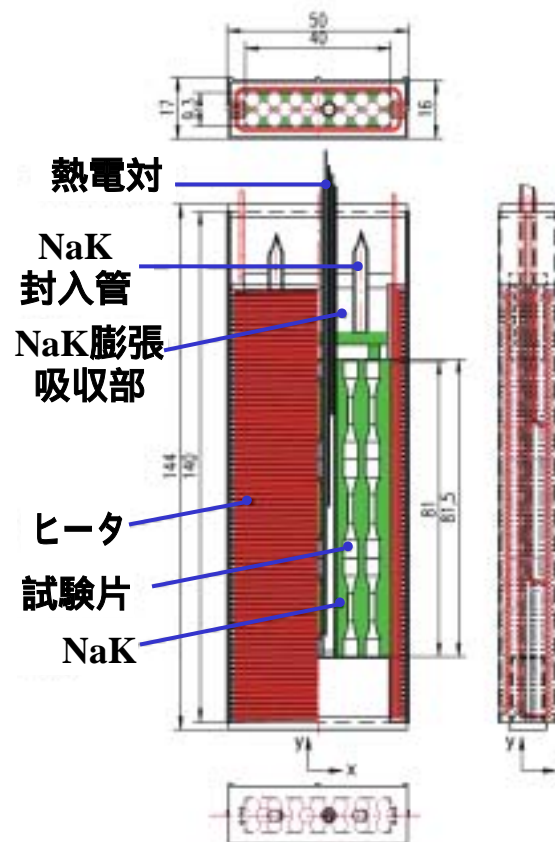
高中性子束領域用テストモジュール

構造材料(微小試験片)照射用

- ・ 照射温度推定精度重視型: 液体金属ボンド、250 ~ 650
- ・ 広温度範囲照射重視型: Heボンド、250 ~ 1000



テストセル断面

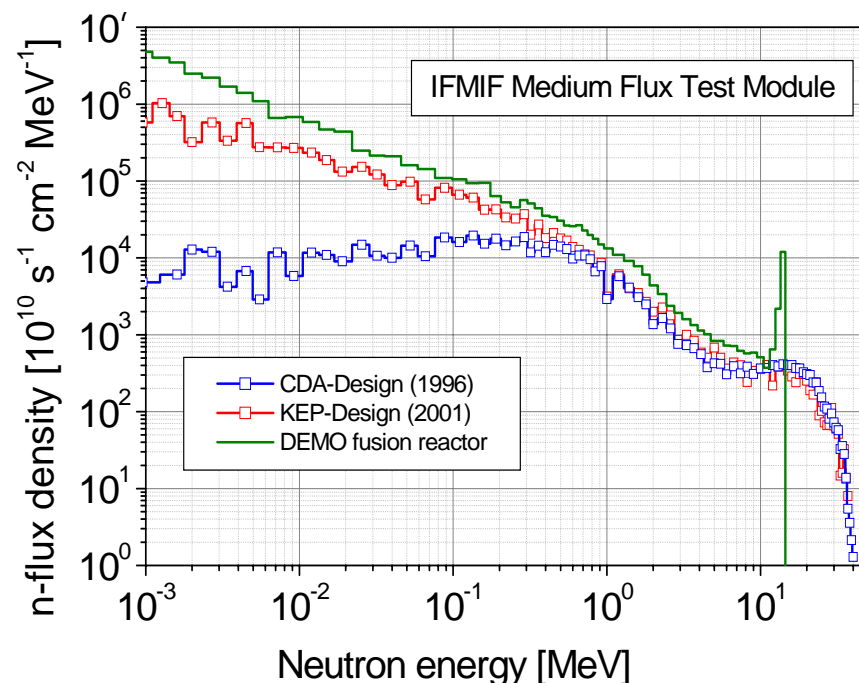
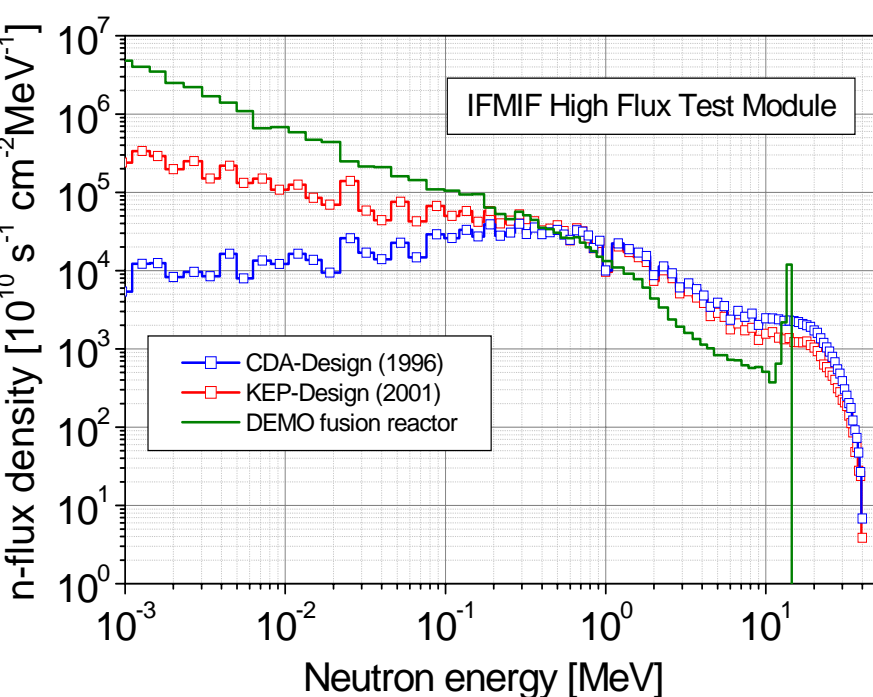


テストモジュール(リグ)

照射温度: 250 ~ 650
リグ装荷数: 12
試料装荷数: 計約970
冷却材: He
ボンド材: Na又はNaK
計装: 熱電対
加熱源: 核発熱 + ヒータ

IFMIF 照射領域のニュートロニクス

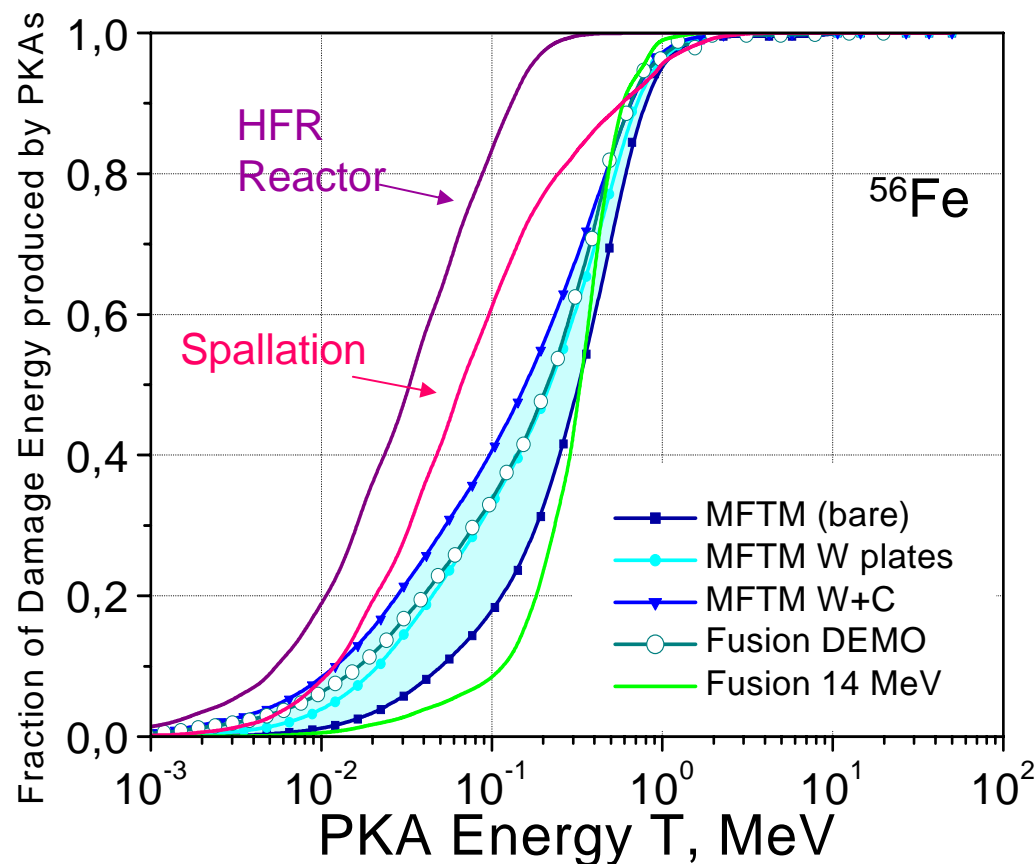
中性子スペクトル



Moderator/reflector: → Substantial improvements in neutron spectrum adaption
→ Irradiation volume increase by ~20%

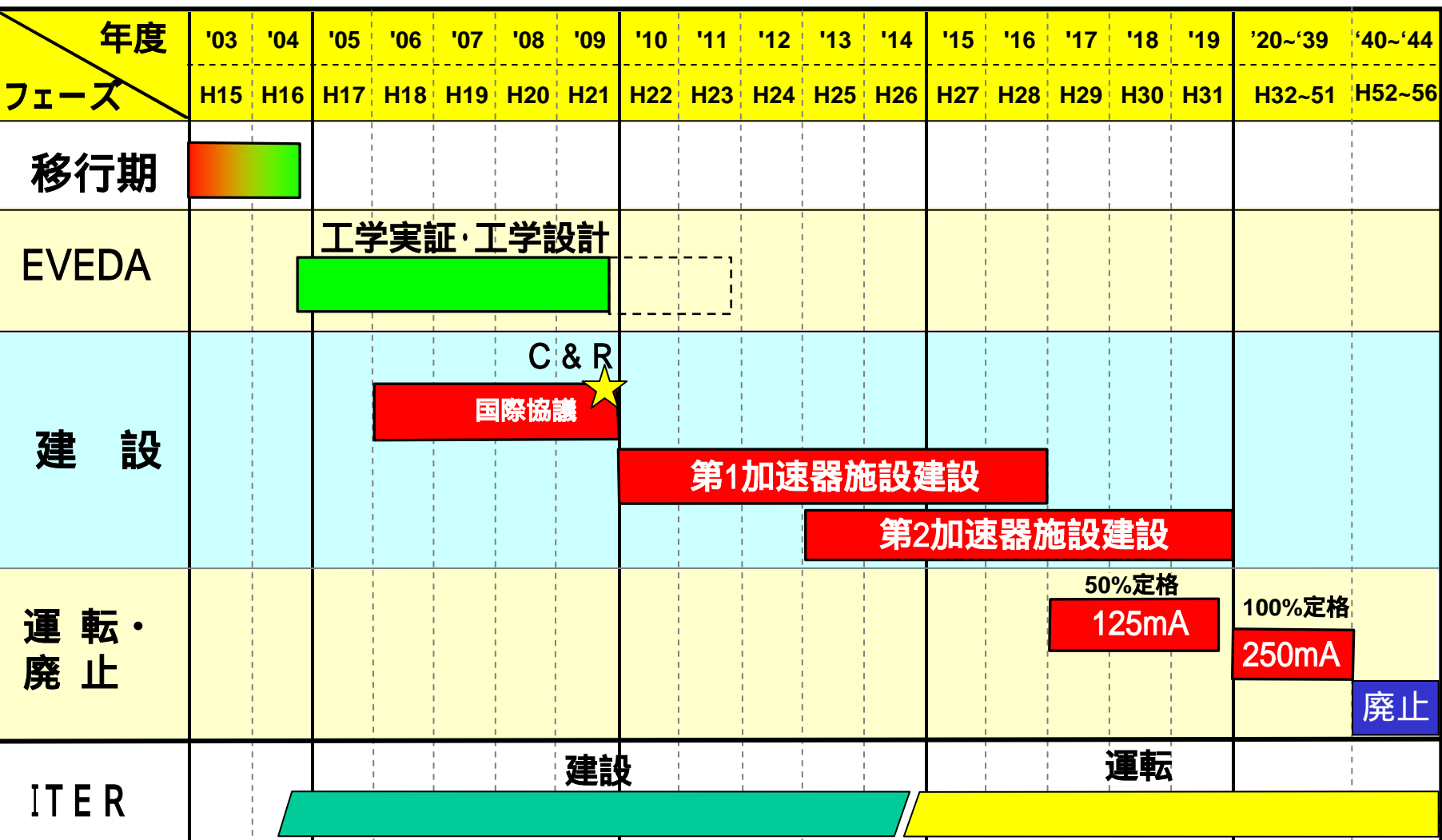
IFMIF 照射領域のニュートロニクス

照射損傷エネルギースペクトル

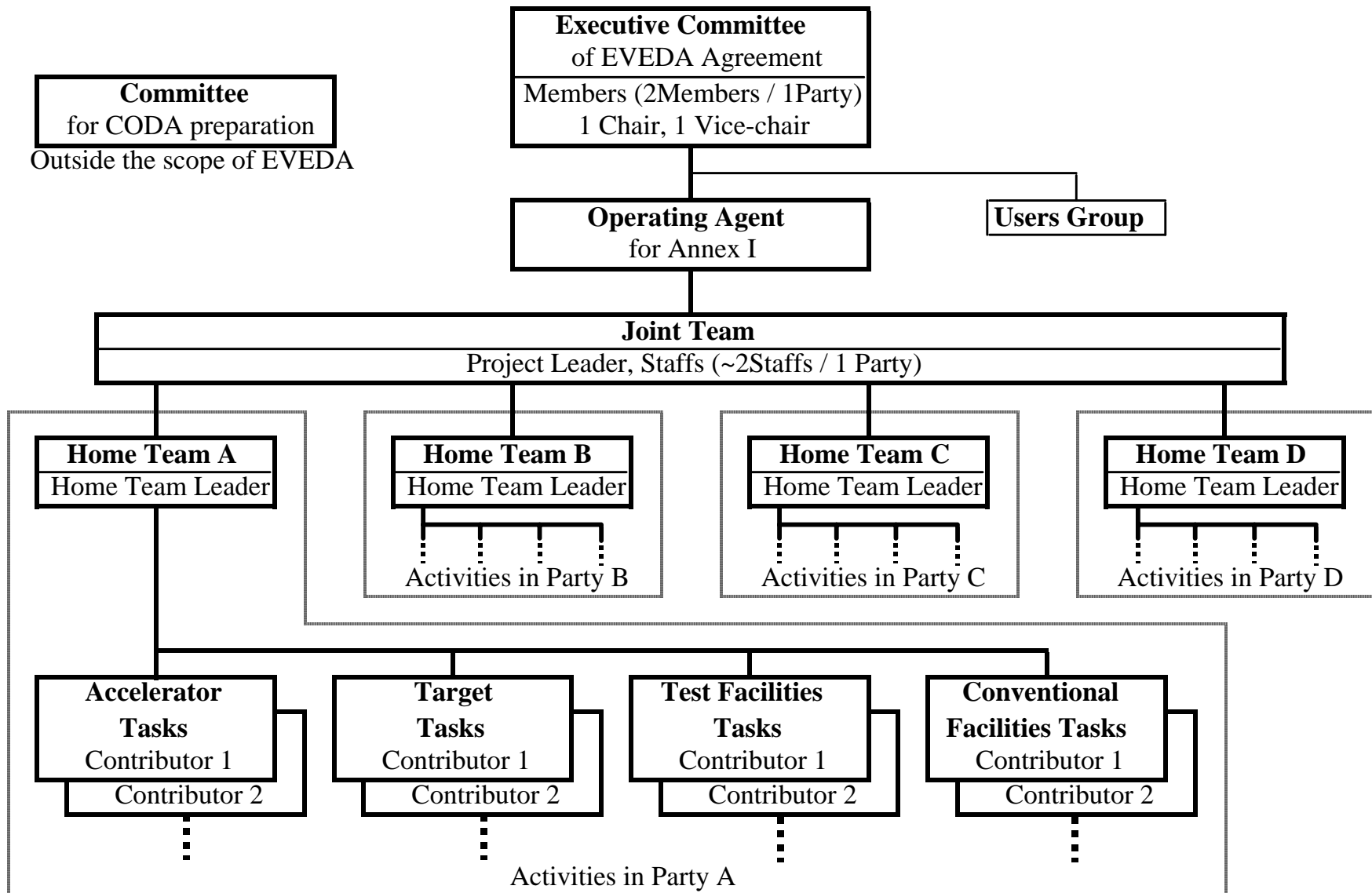


IFMIF (hatched area) meets perfectly the conditions of DEMO-reactor blankets

IFMIF 将来計画 (案)

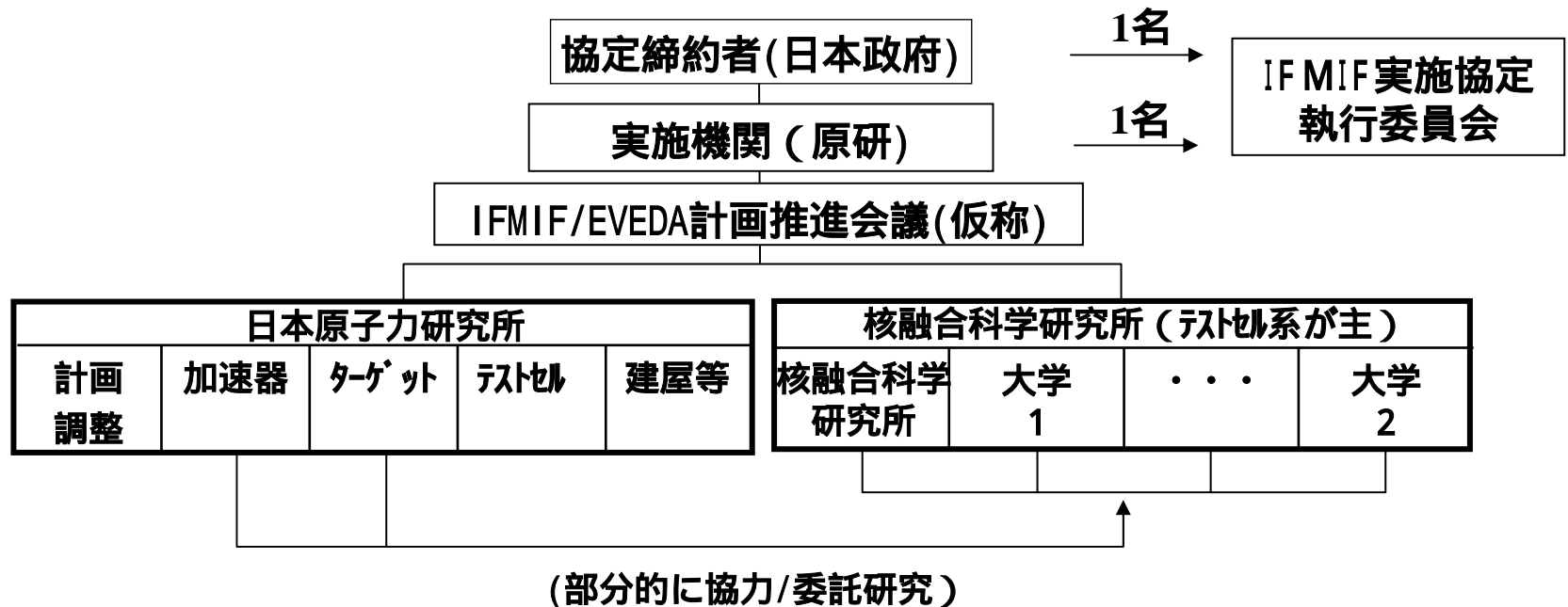


EVEDA 国際協力実施体制(案)



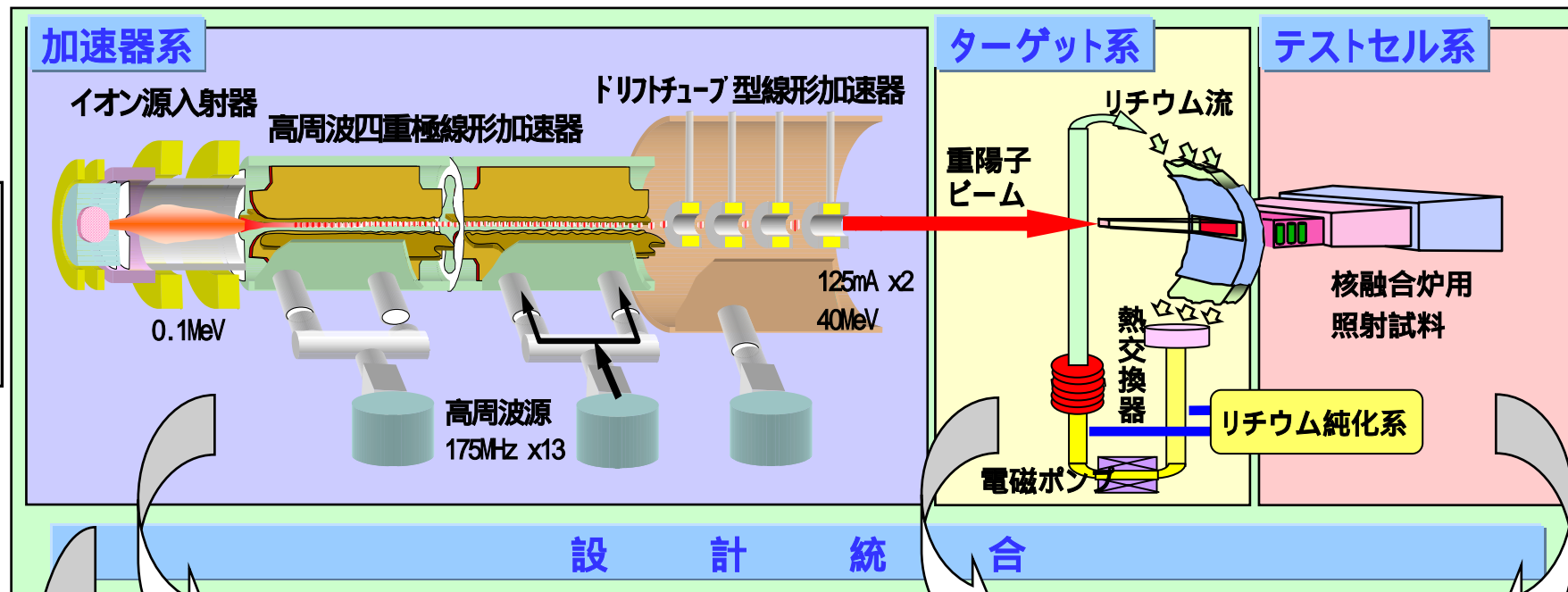
EVEDA 国内連携の実施体制(案)

- 参加者として国が署名し、実施機関として原研の指名を想定。
- IFMIF / EVEDA計画推進会議(仮称)を設置し、オールジャパンとしての計画推進にあたる。
- 各タスクはそれぞれ、原研の核融合工学部(ターゲット系はJNC関連部との連携を検討中)及び核融合科学研究所を窓口とする大学グループが分担協力して実施。



EVEDAタスクの課題分担(案)

構成概念



果実分担



- ・イオン源試験
- ・加速器モデル製作試験
- ・診断系
- ・加速器システム設計



- ・主Liループモデル製作試験
- ・計測 / Li純化系
- ・遠隔操作機器交換
- ・ターゲットシステム設計



- ・テストモジュール製作試験
- ・微小試験片
- ・計測診断 / 遠隔操作
- ・テストセルシステム設計



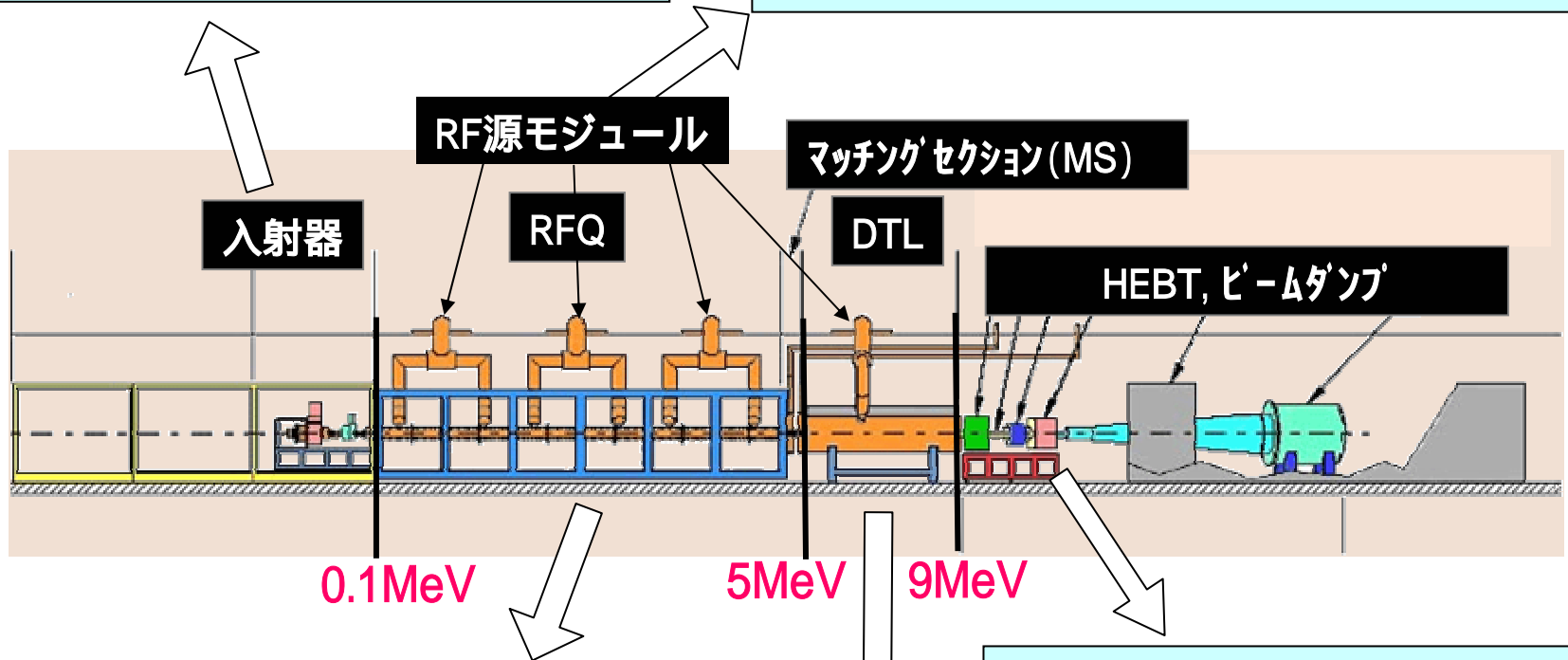
- ・建屋・ユーティリティー設計
- ・安全性検討・機器仕様への反映
- ・サイト想定した法令・許認可調査

加速器系 EVEDAタスク(案)

加速器に関わる工学実証・工学設計を実施

入射系試験 (特に H_2^+ 対応)

高周波源システムモジュール試作



RFQ電力試験 (部分モデル)

非破壊ビーム計測試験

DTL電力試験 (部分モデル)

ターゲット系 EVEDAタスク(案)

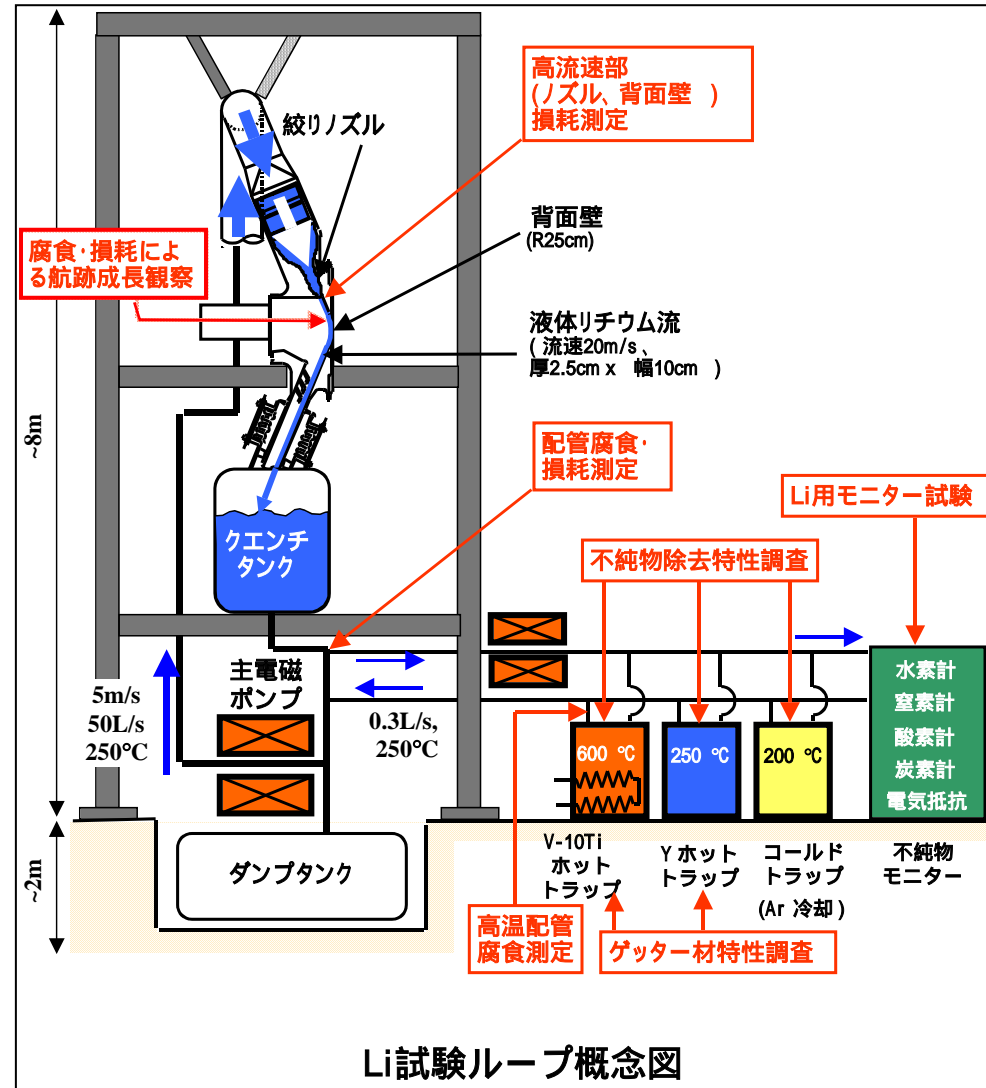
ターゲットに関わる工学実証・工学設計を実施

工学実証試験ループ

実機の30%流量の試験
ループ製作

Liループ長時間運転、
計測系とLi精製系の実証
試験

Li精製系の不純物モニター
とトラップは、専用の不純物
ループで開発し、本ループで
実証試験を実施。



テストセル系 EVEDAタスク(案)

照射試験装置・設備に関わる工学実証・工学設計を実施

- 核的レスポンス評価(中性子束分布等)
- 核データ拡充(>20MeV)

テストモジュールの開発
(中性子中性子減速材 / 反射体)

リチウム流

重陽子ビーム

中間フラックス
領域

低フラックス
領域

垂直型照
チューブの開発
(用途の検討含
む)

高フラックス領域

D-Li反応
(データ拡充・評価)

微量試験片技術
(寸法効果)

- テストモジュールの開発
- VTAの開発
- トモグラフィの開発
- 中性モニターの開発

設計統合 EVEDAタスク(案)

全システムに共通して関わる工学設計を実施

加速器系

重陽子加速器

40MeV
250mA

重陽子
放射化

冷却水

RF電力

RF源

空洞温度制御

建屋設計

ターゲット系

液体Liターゲット

250 - 300
20m/s

液体Li流

除熱Li ループ

Li純化系

除熱
有機媒体ループ

中性子
核発熱

DI-2d
放射線遮蔽

テストセル系

テストモジュール

10^{14}n/cm^2 @500cc

Heガス

試験片

除熱He ループ

PIE施設

DI-2c
運転方法、中央制御

電力、真空、HVAC、冷却水、放射性廃棄物・トリチウム処理

DI-2e

RAM
稼働率 : 70%

DI-2f

安全性

DI-2g

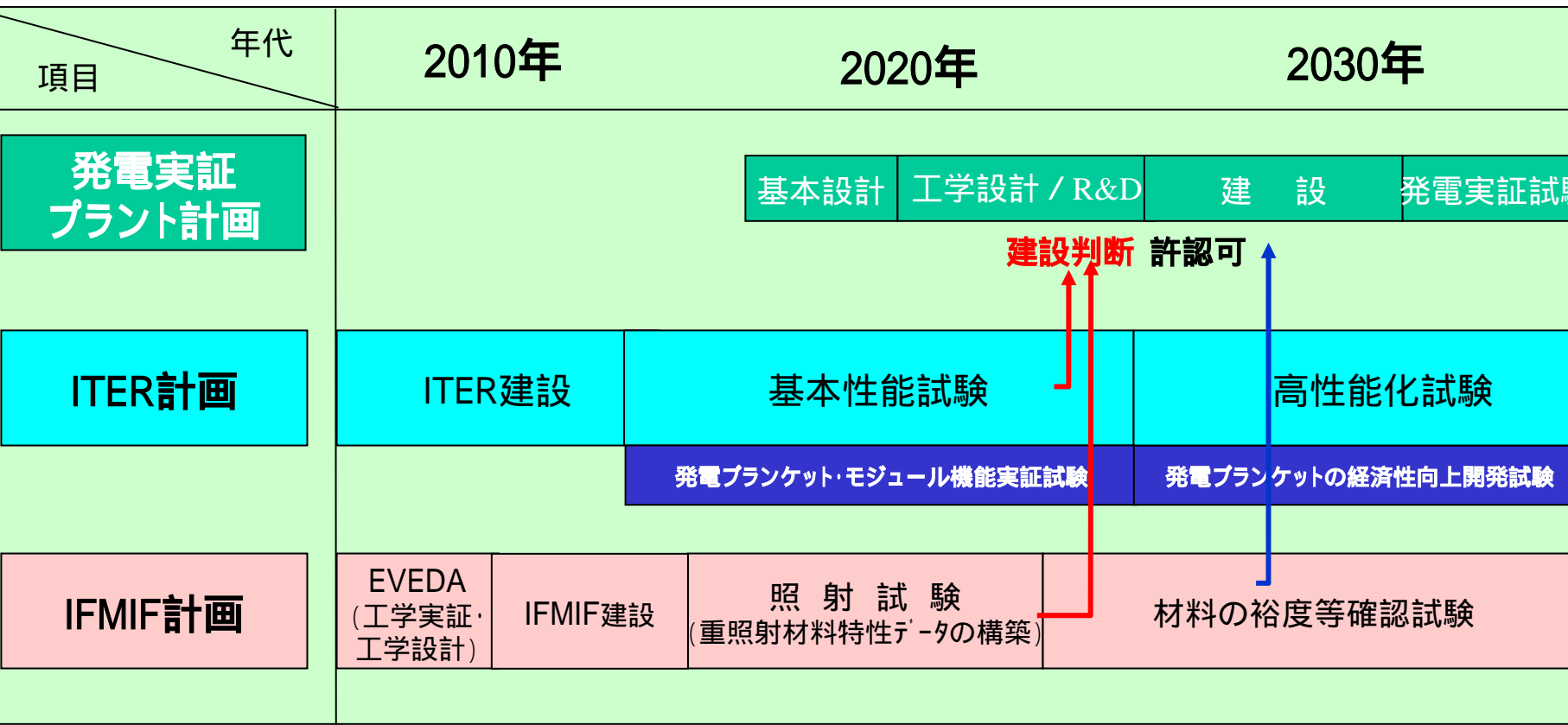
許認可

DI-2h

コスト評価

核融合早期実現に向けた道程の検討例

核融合実用化加速案(原子力委員会核融合研究開発基本問題検討会(平成15年7月25日)より抜粋)



まとめ

- 核融合炉材料照射試験用中性子源として、d-Li型であるIFMIFは、唯一の現実的な方式として国際的に合意されている。
- IFMIF建設に向けたIEA国際協力活動のもと、国内では原研と大学との連携協力体制が確立され、システムの長時間安定動作の実現に関わる要素技術開発(KEP)を成功裏に実施した。
- 次段階として、要素設備のプロトタイプ試作と運転実証、および施設全体の詳細な工学設計を実施するEVEDAの立上げに向けた準備が現在進められている。