

核融合材料開発と 規格・基準・信頼性

核融合ブランケット構造材料について 低放射化フェライト鋼の場合

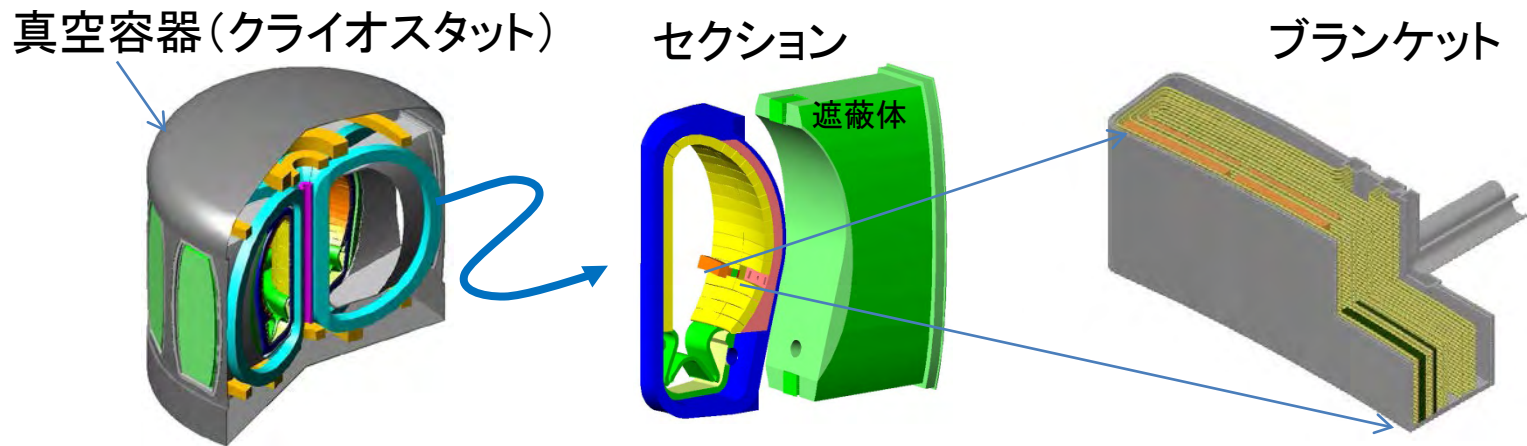
日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

核融合炉構造材料開発Gr

谷川博康

核融合炉の安全性とブランケット



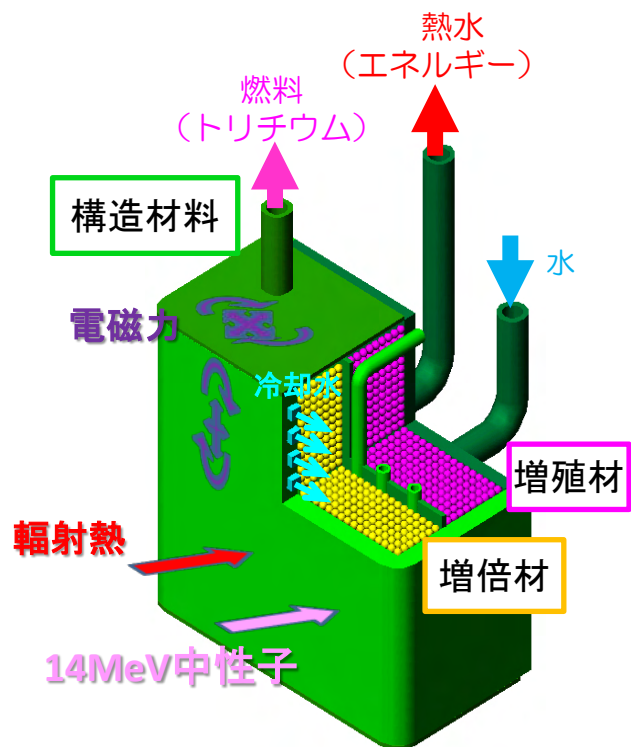
核融合炉の安全性確保と規格・基準策定の考え方

- 核融合の安全上の特徴に基づいた安全確保の基本的な考え方を定める。
- 基本的な考え方に沿って、安全上の目標を達成するために必要な安全設計・評価の基本方針及び技術基準を定める。
- 技術基準に沿って、構造設計基準や耐震設計基準等を定める。

安全確保の考え方に対するブランケットの課題:

ブランケットの構造材料が重照射を受け、必ず何かしらの特性劣化が起きることが前提となる点(回避できない点)が極めて重大な課題となる。

ブランケットに求められる機能・性能と要求仕様



- ブランケットに求められる機能
 - 中性子遮蔽
 - 燃料生産(トリチウム増殖)
 - 熱の取り出し
- ブランケットに求められる性能
 - トリチウム増殖比(TBR)1.05以上を確保できること
 - 想定寿命(例えば:2年/100dpa)の間、想定される運転モードで、構造・機能を維持すること
 - 低放射化性能(長寿命核種生成抑制)を目指す

- 核融合炉の安全確保の基本的な考え方に基づいて定められた構造設計基準と整合するように、ブランケットおよびブランケット構造材料への要求仕様が定められる。
- この材料への要求仕様が保証するために、材料規格が定められる。

★ 材料規格を定めるためには、材料特性評価と劣化機構の理解に加えて、原型炉における安全性確保の基本方針と、それに対応した構造設計基準が必要である。

ブランケット構造材料開発戦略

【現状】

- 核融合炉プラント全体の規格・基準制定方針が定まっておらず、よってブランケットに対する要求仕様、ひいてはブランケット構造材料に対する要求が明確でない。
- 核融合中性子重照射を受ける構造体の設計技術(デザインルール)は存在せず、且つ、TBR確保の観点から大きな設計裕度はとることはできない。(既存の圧力容器や原子力機器とは大きく異なる)
- 構造材料開発、特に材料照射研究は時間がかかる。
- 14MeV核融合中性子照射施設が現存しない。**

★ 設計チームとの綿密な連携の基、核融合炉設計(ブランケット設計)を分析し、材料に関わる重要課題を抽出して、仕様の確定およびデータ取得を進める。

★ 開発は2段階に分けて考える。

初期設計範囲:核融合中性子特有の照射効果が発現しないと予想される条件範囲

後期設計範囲:核融合中性子照射効果が顕著になると予想される条件から想定寿命までの範囲

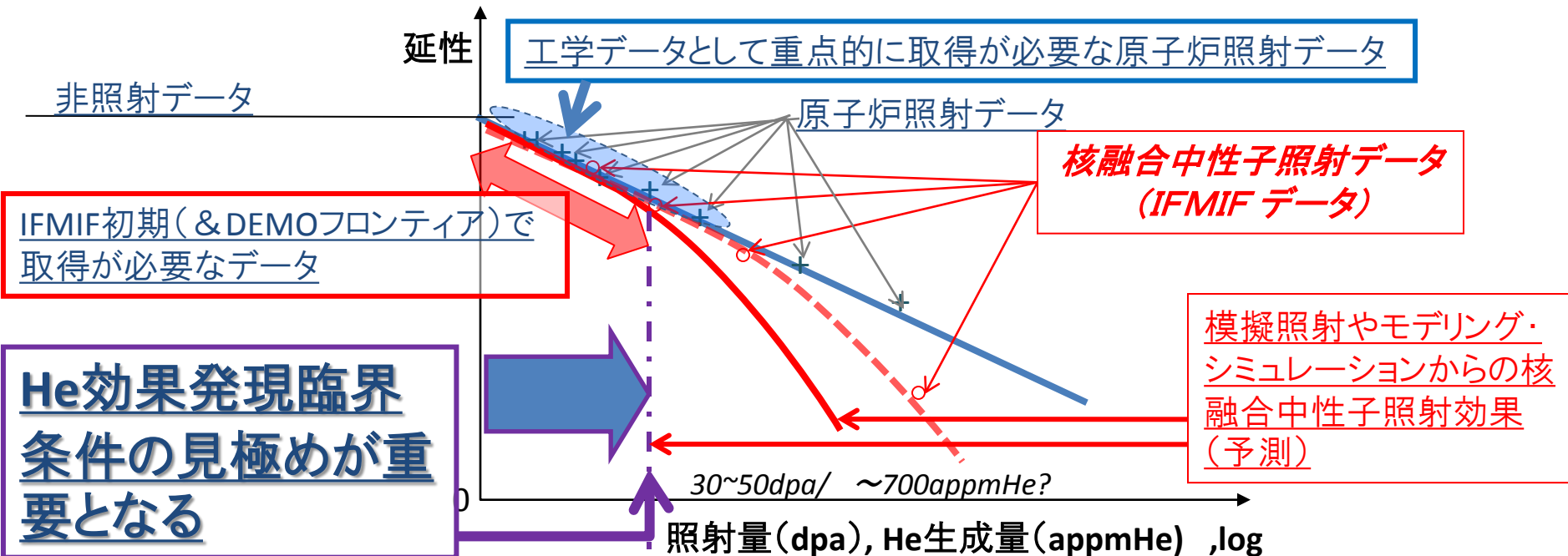
★ 初期設計範囲は、模擬照射試験、モデリング・シミュレーション等による機構論的理解に基づいて予測し、設計では原子炉照射データを根拠とする。

★ 初期IFMIF照射データはこれを保証する。

★ 後期設計範囲は、IFMIF照射データによる裕度評価を基に、段階的に運転範囲の拡張し、且つブランケット設計改良を図る。

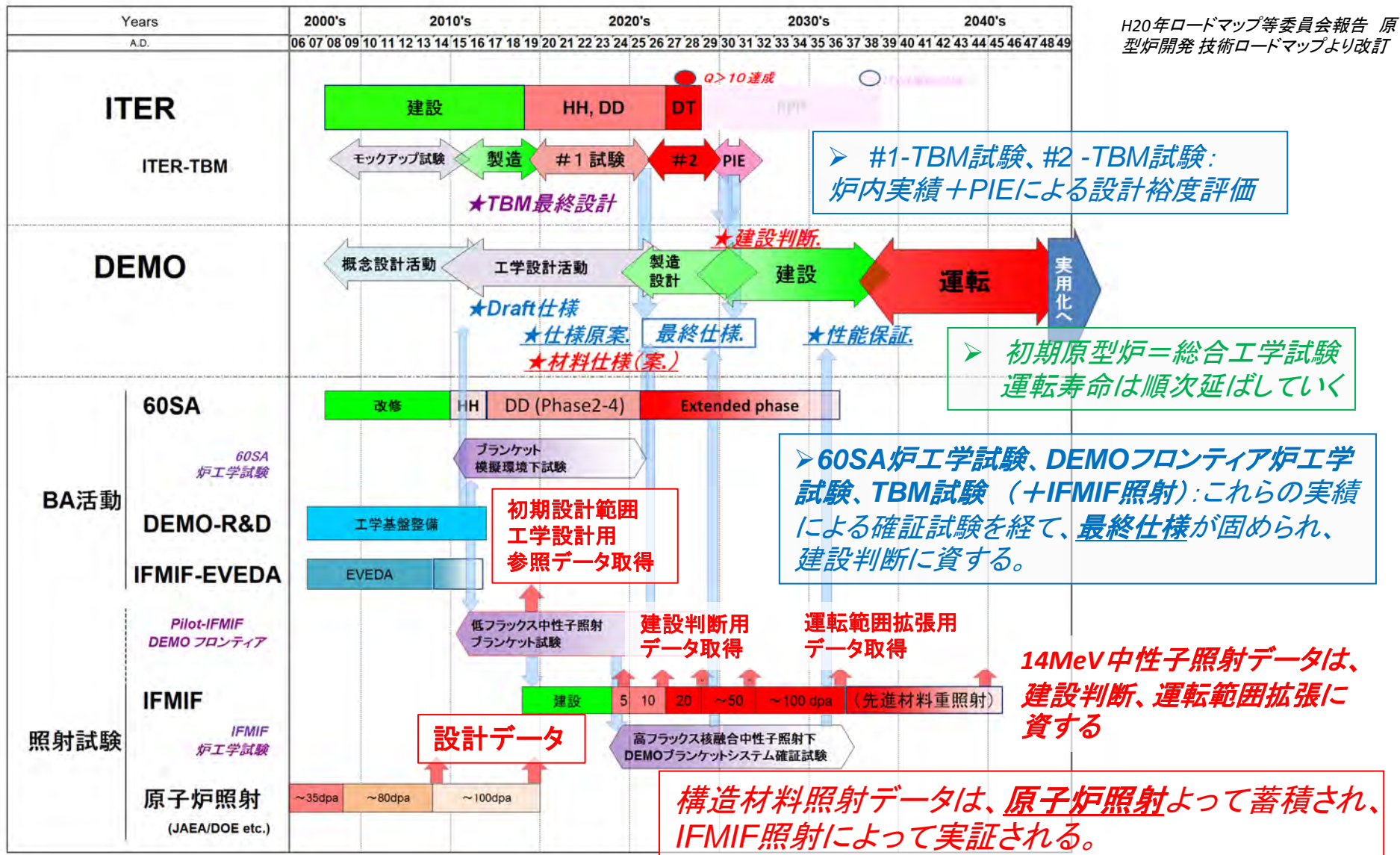
初期ブランケット設計範囲

- 核融合中性子照射データが、原子炉照射データと大きく変わらないと考えられる範囲での設計となる。初段階ではこの範囲の照射データ整備が必要となる。
- ★ 微小試験片によって取得された(および取得予定の)原子炉照射データの正確な評価が必要
- ★ 模擬照射試験、モデリング・シミュレーション等による機構論的理解に基づいた、核融合中性子照射効果発現臨界条件の特定が重要となる。
- IFMIF照射データは、初期設計範囲データの確証を与えるのみならず、データ精度の向上、即ち設計裕度評価(寿命評価)に必須となる。

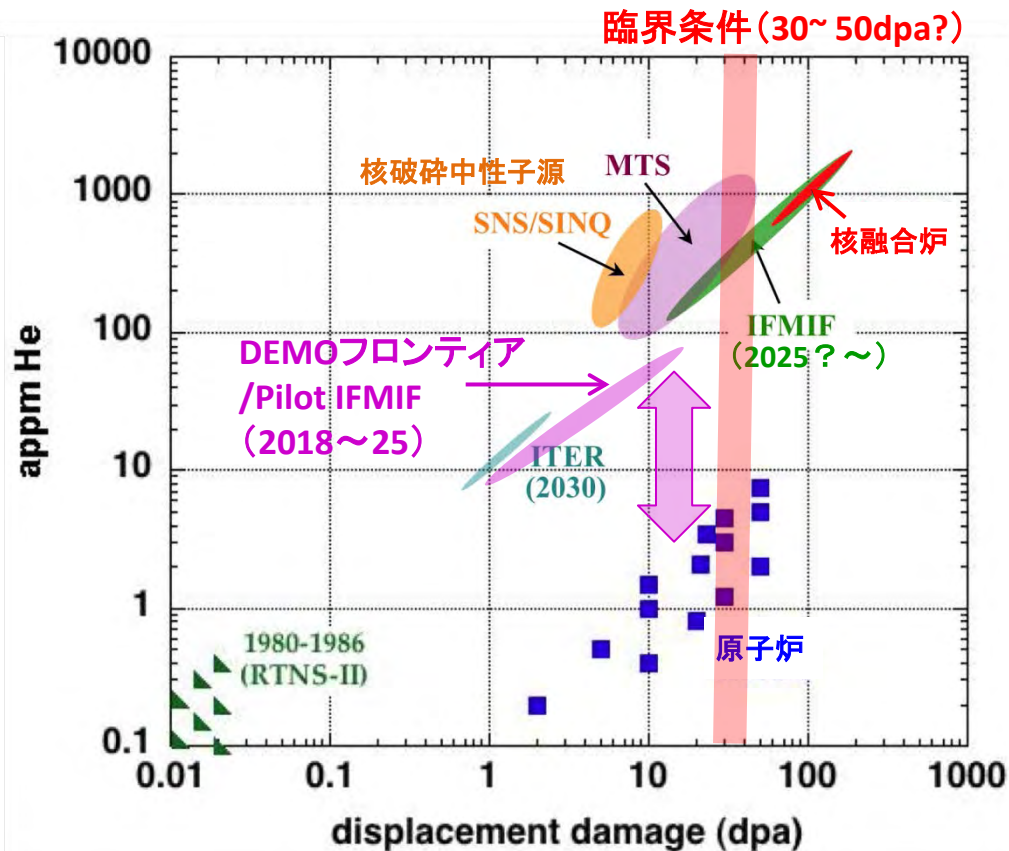


原型炉ブランケット開発戦略

初期: DEMOフロンティア、IFMIF、ITER (TBM試験)、60SA炉工学試験による最終仕様確定
 後期: IFMIF照射データの拡充とDEMOの段階的運転延長による実証



ディファクトスタンダード化戦略



Original figures are provided by S.J. Zinkle, ORNL/USA

実績を先行して積み重ねる

- 製造・製作実績
- 実機利用実績
 - ✓ 耐熱鋼 (規格化が必要)
 - ✓ TBM構造材料 (仏規制対応が必要)
 - ✓ IFMIFターゲット構造材料
 - ✓ その他の照射環境下での利用
 - 高速炉等 (規格化が必要)

データベースを充実させる

- 複数ヒートからの信頼性の高いデータを有すること。
- 基本となる原子炉照射データが充実していること。
- IFMIF照射供試材として選ばれること。

★ 実績と原子炉照射データの充実が最重要 (実機利用対応規格化を含む)

★ 初期原型炉ブランケット設計範囲での照射データを早期に充実させることが重要。

=DEMOフロンティア照射は、原型炉ブランケット設計検討、IFMIFやTBM設計確証への貢献のみならず、F82Hディファクトスタンダード化の観点でも重要

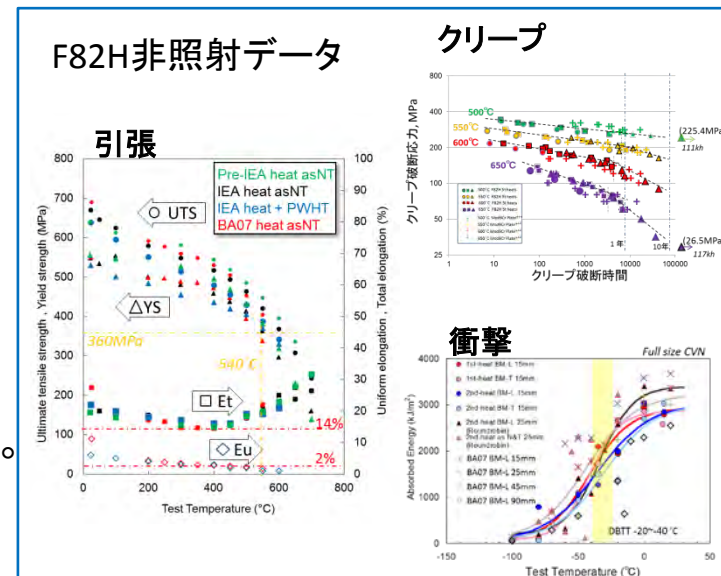
低放射化フェライト鋼 (F82H) 開発の現状と課題

- 製造・製作技術は耐熱鋼(T91等)の技術を応用することで対応出来ることから、大きな課題は無い。
 - 3~5t溶解実績x8回、薄板~厚板、矩形管、円管等製作済み
 - TIG、EB溶接健全性も確認
- 特有の問題として添加元素Ta*が関わる事項があるが、BA活動で対処中。 (*通常鋼では利用されていないため)
- 非照射データは、1次設計検討に十分なだけはそろっている。
- 照射データについても、検討するに値するだけのデータはそろっている。
- 照射効果抑制にむけた知見はそろいつつある。

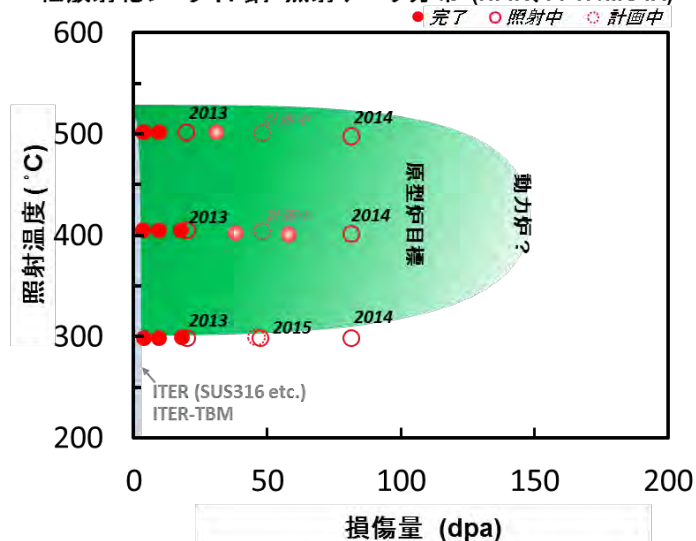
【課題】

要求が明示されていないので、過不足が判断出来ない。

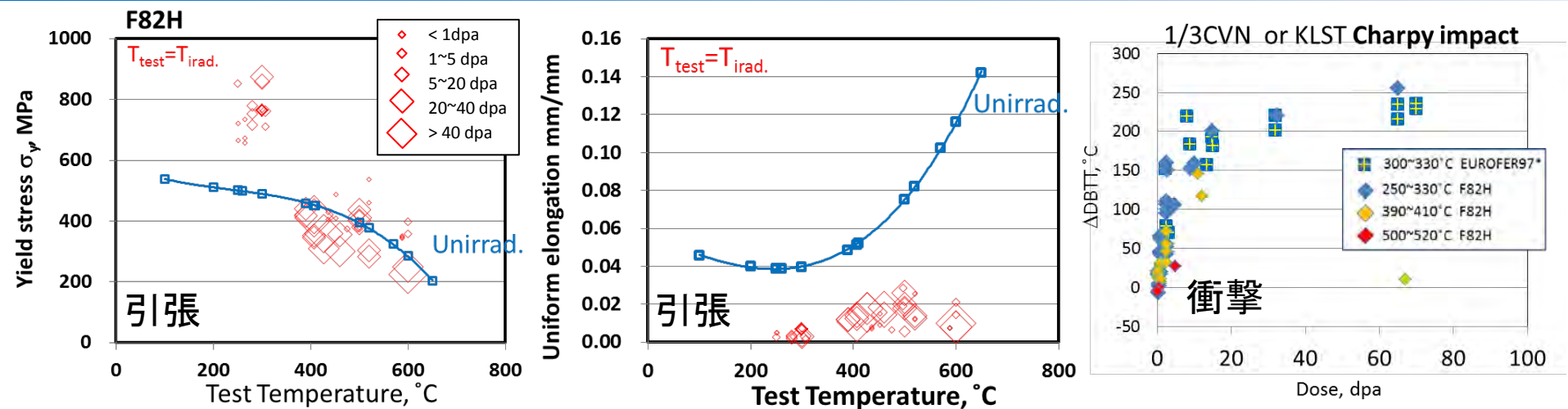
- (照射)データ: 腐食、クリープ、疲労、靱性(J値、他モード)等
- 評価法: HIP接合非破壊評価法
- + 過去の照射データは、ほとんどが1ヒート(F82H-IEA)の板材を照射した微小試験片データであり、データ点のほとんどがn=1。
- ++ 非照射データも、引張・衝撃以外はヒート数少ない。



低放射化フェライト鋼 照射データ分布 (HFIR, FFTF/MOTA)

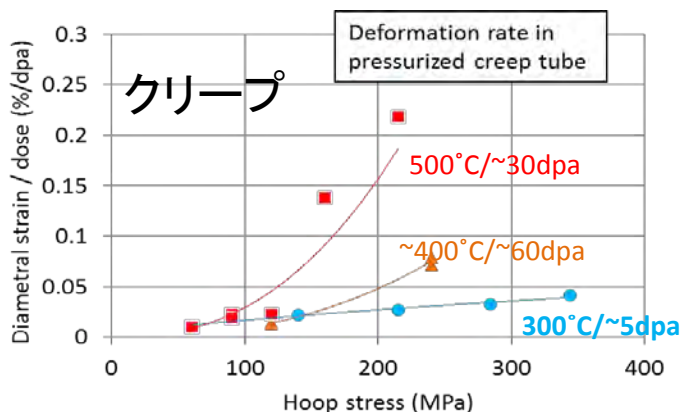


設計上課題となると予想される照射効果



- 照射硬化・脆化 (DBTTシフト) が一般的に認識されている課題。

↔ 硬化自体は1次応力に対しては安全側、DBTTは使用温度を超えない



十分な一様延性を有することが既存設計技術の大前提。
(ITER設計基準: SDC-IC: でも同様)

→ 延性を喪失することが課題

+ 本来クリープが問題にならない温度 (375 $^{\circ}\text{C}$) 以下でも照射誘起クリープが起こり、照射硬化が起こらない高温側では照射加速クリープが問題となる。

★ 2次応力 (ひずみ制御) 負荷を設計で評価する上では、クリープ発現および延性喪失は、特にクリープ疲労や弾性追従において大きな課題であり、照射構造設計技術開発を要する。

人員育成・確保、産学連携

【現状】

核融合炉構造材料研究を主テーマとする大学研究室が減少
共同研究を実施している大学研究室でも、他分野もカバーしている

→ 優秀な人材の多くは修士終了時に就職する選択をする
人材の確保(博士後期過程への進学他)が困難

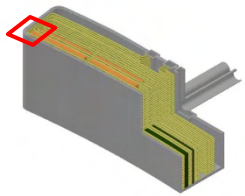
- ✓ 人材育成には工学研究(プロジェクト開発)への共同研究を介して、大学での研究活動を拡充することが重要。
初期原型炉ブランケット開発には、機構論的理解に基づく予測が必須であり、大学での学術的研究開発活動が、工学活動の基盤となる。
- ✓ 人材確保、産学連携には、根幹となる原型炉開発プロジェクト研究の国家レベルでの長期的戦略提示が必要。
*産業界: 長期対応人員(チーム)を配備した対応が出来る。
学生: 基幹となる国プロがあって、はじめて明確なキャリアアップを想定でき、結果として博士課程に進学する決断ができる。*

まとめ

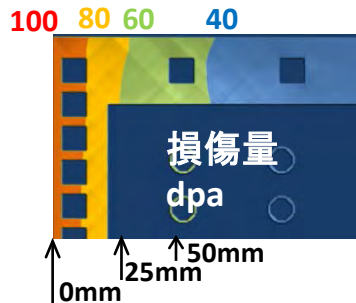
- 核融合炉の安全確保の基本的な考え方に基づいて定められた構造設計基準と整合するように、ブランケットおよびブランケット構造材料への要求仕様を定められる。その材料への要求仕様を保証するために、材料規格が定められる。
- 現状では核融合炉プラント全体の規格・基準制定方針が定まっておらず、よってブランケットに対する要求仕様が明確でない。
- 核融合中性子重照射を受ける構造体の設計技術(デザインルール)は存在せず、既存の圧力容器や原子力機器とは大きく異なる。
 - ★ 設計技術開発と連動した構造材料開発が必要である。
- 核融合炉設計(ブランケット設計)を分析することで、ブランケット構造材料に対する要求および重要課題を抽出し、材料開発およびデータ取得を進める。
- 初期ブランケット設計条件範囲は、核融合中性子特有の照射効果が発現しないと予想される条件(発現臨界条件)までであり、その臨界条件は模擬照射試験、モデリング・シミュレーション等による機構論的理解に基づいて予測し、設計は原子炉照射データを根拠とする。
 - ★ 原子炉照射により設計用照射データを蓄積し、IFMIF照射により実証する。
 - ★ 原子炉、フロンティア、IFMIF照射が設計技術開発、材料開発の根拠となる。
- ディファクトスタンダード化には、実機への使用実績(+対応した材料規格化)と原子炉照射データの充実、および初期ブランケット設計条件範囲での核融合中性子照射データを早期に充実させることが重要である。

參考資料

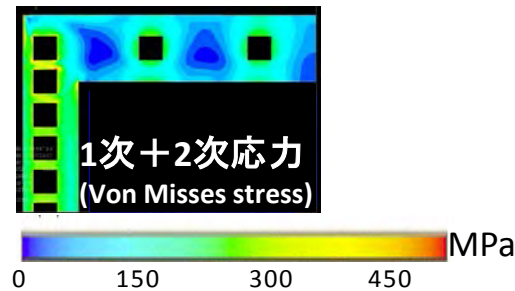
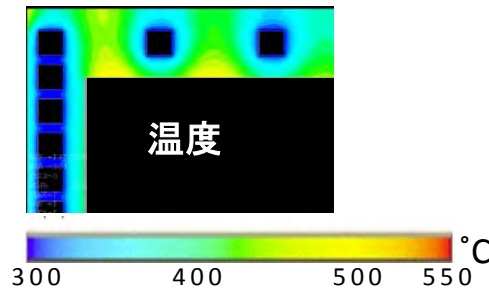
ブランケット負荷条件と構造材料開発課題



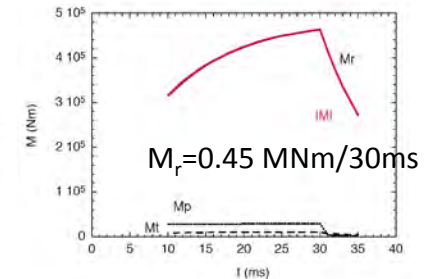
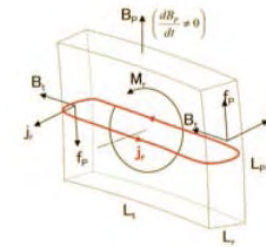
照射損傷(@2年/100dpa max)



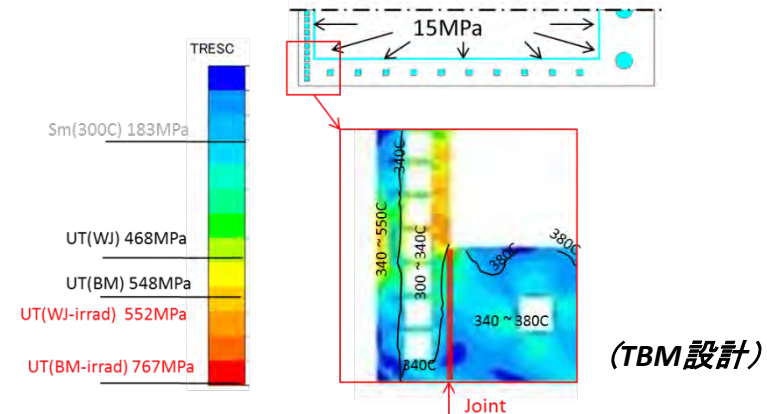
定常運転 $\sim 5h < t < 2y$



非定常時(ディスラプション) $t < 30ms$



事故時(冷却水漏れ事故) $t > 1 \text{ min}$



- 第一壁は核変換元素(He、H)生成を伴う重照射環境であり、且つ狭い範囲で条件が異なる環境となる。
- 1次応力(内圧・自重による応力制御型負荷)、2次応力(熱ひずみによるひずみ制御型負荷)に加え、定常消滅ディスラプション時の極短時間(衝撃)負荷に耐えることが期待される。
- 大規模ディスラプションや事故時には、真空容器の健全性を脅かさない壊れ方に設計できることが期待される。

BLK構造設計では、これらの照射構造体変形挙動を予測・保証し、信頼性を確保する必要がある。

★この様な照射構造体の設計技術は現存せず、既存の圧力容器・原子炉機器と大きく異なる。

ブランケット構造規格の開発が求められた場合の 材料開発が関わる規格と信頼性要求

- **材料規格:**
 - 材料特性の確保
 - 実規模製造時での性能保証
 - 検査(受入検査)
- **製作規格:**
 - 加工
 - 熱処理
 - 溶接(接合)
 - 溶接(接合)後熱処理
- **検査・試験規格:**
 - 材料特性試験
 - 耐圧・漏洩試験(耐圧性・気密性確認)
 - 非破壊試験
 - 検査体制(検査員の資格と認証)

+

間接的に関わる規格

- **設計規格:**
 - 脆化構造体の設計技術基準
- **維持規格:**
 - ディスラプション発生時の継続利用判断

規格の目指すところ:

14MeV中性子照射効果によって、一部が脆化(延性喪失)する、不連続部分(溶接・接合部)を有する照射構造体(=ブランケット)の機能・性能と構造健全性を保証する。

統計的に信頼性の高いデータを提示しなければ、規格として成立しない。

- ✓ 実規模・複数ヒートでの、各部材形状についての性能保証
- ✓ 想定製作工程(加工、熱処理、溶接・接合)に対応した特性評価
- ✓ 評価法そのもの(例:微小試験片試験技術)を保証する試験

★ 各段階で、どのレベルの信頼性を必要とするのかによって要求が変わる。

- ✓ 核融合設計基準の実証が原型炉の目的そのもの。
- ? 原型炉にむけて整備する設計技術基準の信頼性を、どのように実証するのか?
- ? その根拠となる材料現行規格で定められる新規材料に対する要求が、非照射のみならず照射環境下についても求められるのか?
- ? 照射効果は安全率(設計裕度)の範囲で処理可能?

14MeV核融合中性子照射効果

核融合中性子の重照射効果についての工学データは無い。

- 既存の知見は、模擬照射等から推定。
- 定性的には、理解が進みつつある。
 - 核融合中性子照射効果が顕著となる条件は予測可能

★ 初期原型炉ブランケット設計の基盤となる工学データは核分裂炉・高速炉照射データである。

- IFMIFは、確証データとして必須
 - TBM等でのポートサンプルは、あくまでも確認用であり、照射データにはならない。
- ★原子炉とは照射環境が違う：

核融合ブランケットではmm単位で条件が変わる

- ポートサンプル有効性を確認するためのポートサンプル試験は、必要であろうと思われる

