

長寿命高速炉プラント実現に向けた構造材料開発の現状

The Present Status of Advanced Structural Material Development for the Long-Life Fast Reactor

サイクル機構	青砥 紀身	Kazumi AOTO	Member
サイクル機構	若井 隆純	Takashi Wakai	Non Member
(株)日立製作所	祐川 正之	Masayuki Sukekawa	Non Member
三菱重工(株)	伊達 新吾	Shingo DATE	Non Member
日本原子力発電	井上 和彦	Kazuhiko INOUE	Non Member

The present status of structural material development for Japanese long-life sodium cooled fast breeder reactor (LLSFR) is reported. Structural material is vital for maintaining its integrity of such a huge complicated plant throughout the life and is expected to play an important role to contain the risk in the plant when accidents occur in LLSFR. Most of appeared risks of the plant seem to be caused by the uncertainties of the material, scattering of material properties, uncertainty of operational conditions and the accuracy of design approach and life evaluation methods. This material development project is carried out under an advanced philosophy to avoid or suppress the effects of those uncertainties.

Keywords: Long-life FBR structural material, 12Cr steel development, uncertainties of the material, Resistivity for thermal stress, Phase stability, high temperature material strength

1. 緒言

先進的で複雑巨大、かつ非常に厳しく安全性が問われるプラントにおける健全性確保の基盤は適用される材料にあると言ってよい。中でも、事故時に影響の拡大を抑える「防壁」となる構造材料の選択は重要である。高速増殖炉(以下 FBR)はそうした人工物の代表であるが、現在なお開発途上にあることから、こうしたプラントにはあまり類例がない設計と並行した専用材料開発が進められている。

安全性が最優先に求められる原子力プラントに対しては、従来、保守的な思想から、健全性の根幹となる材料選択には工業的実績(他分野を含めた商用実績)のある材料が対象とされてきた。しかし、先進的なプラントの設計、建設という観点からは、その特徴が最大限活かされる、あるいは考慮されたプラント実現を目指すのが自然であり、材料選択もその観点から行なわれるべきであるとの考えも一方にある。プラント健全性確保の基盤となる材料には、供用中に発生するリスクに対して少なくとも考慮すべき3つの不確実性がある[1]。1つは製鋼・製造過程における種々の条件の差や製品管理手法の違い等に依拠する商用材料に認められる特性のばらつきであり(材料特性の不確実性)、2つめは使用中の環境、想定負荷や雰囲気および温度等の予想

できない変動等(使用環境の不確実性)である。さらに、設計時に適用する強度評価手法や寿命予測解析が有する精度が3つめの不確実要因(評価の不確実性)となる。従来の材料選択思想が材料特性の持つ不確実性を極力抑制しようとするものだとすれば、後者は使用環境における不確実性の影響緩和を主眼とした思想と言える。

一方、2001年から有力候補プラントの選定段階(Phase II)に入った、核燃料サイクル開発機構(以下サイクル機構)および電力ならびに国内プラントメーカーなどが進めている「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」(以下 FS)[2,3]では、FBRの安全性の向上等と合わせて経済的競争力を高める努力がなされている。そのため多くの革新技術や概念の導入が検討されているが、最も効果的な概念として60年を目標としたプラントの長寿命化が注目されている。現行のFBRを含む原子力プラントの設計基準は、単純化した理解では、統計評価に耐える有限な量の材料特性データベースを基盤として成立している。このデータベースは、対象構造材料に関する、室温から適用温度を含む温度範囲について、引張、疲労、クリープ等の基本的な材料試験データによって構成されているが、例えば、時間依存損傷であるクリープについては最長10万時間(試験期間約11年間に相当)程度のデータが含まれているのが普通である。そうした評価基盤である材料

連絡先:青砥紀身、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田4002、核燃料サイクル開発機構大洗工学センター、電話:029-267-4141、e-mail: aoto@joec.jnc.go.jp

データの試験時間を大きく超えたプラント長寿命化の要求は、時間外挿が必然的に内包する評価の不確定性の増大(精度の悪化)をもたらす。

ここでは、以上のような状況を背景に、対象を長寿命ナトリウム(Na)冷却型FBR(LLSFR)として、使用環境の特徴を材料仕様に極力反映することで環境の不確定性がもたらす影響の緩和を図り、さらに寿命評価等の不確定性を抑える目的から高温長時間、製造時の組織が安定に維持されるFBR用構造材料の開発を目指した研究開発の現状について報告する。

2. 長寿命高速増殖炉用構造材料開発の基本思想

一般的な構造材料に共通する、1) 溶接施工性や2) 費用対効果が良好なことに加えて、FBRプラントにおけるリスク軽減のために構造材料開発に向けた特徴的かつ重要な要求は2つある。これまで、使用環境および評価の不確定性、ならびに材料特性のばらつきがリスク顕在化に直接結びつくことを抑制するために、適切な裕度を含む高温構造設計基準や付随する材料強度基準が策定されているが、以下の要求は陽にはそうした基準類に現れない、材料の本質にリスク軽減を求めるものである。

(1) 耐熱過渡性

多くのFBR機器、構造物に加わる主要な負荷は、プラントの起動、停止における変動も含め熱の伝わり易いNaを冷却材としていることから、温度変動に起因する過渡熱応力となる。そのため、材料が持つ個々の高温材料特性の優劣では分かり難い、熱応力発生抑制能力とクリープ強度とのバランスの良さが要求される。この特性(耐熱過渡性)は以下の

指標で評価できる。

$$\text{比高温強度(耐熱過渡性)} = \frac{\text{10万時間クリープ強度}}{\text{想定温度変動により発生する応力}}$$

この指標により、単純な高温強度のみの比較では確かめられない、FBR用構造材料に必要な熱的特性(線膨張係数)、縦弾性係数、およびクリープ強度特性の均衡程度を把握する。

(2) 変位(ひずみ)制御型負荷に対する特性

同様にプラントにおける主たる負荷形態からの要求であるが、FBR構造材料では変位(ひずみ)制御負荷が主要となることから、材料開発時、設計時に弾塑性関係と高温強度特性のバランス、特に延性の確保が求められる。これは、一般に、高温強度に優る鉄鋼材料は延性が不足することが多く、反対に高延性を志向した材料は多くの場合ある程度強度が抑制されることになるからである。図1に負荷形態と材料に求められる適切な特性との関係を模式的に示す。図に示したように、応力制御負荷(一点鎖線)には高強度材が有効であるが、ひずみ制御負荷(点線)が支配的である場合、高強度材料には大きな応力が発生するため、結果として高いクリープ強度を十分に活かさないことがある。また、わずかなひずみのばらつきが発生応力の差を生むことから、寿命予測に大きく影響する可能性がある。一方、強度的には劣る延性志向材の場合、変動ひずみに因る発生応力は高強度志向材に比して小さく、結果的に長い寿命を得ることが可能となる。図は単純化した説明であることから、全ての鉄鋼材料を説明できるものではないが、プラントにおける支配的負荷形態を考慮した材料設計、選択により、材料の特長をより有効に発揮させることができること、さらに、供

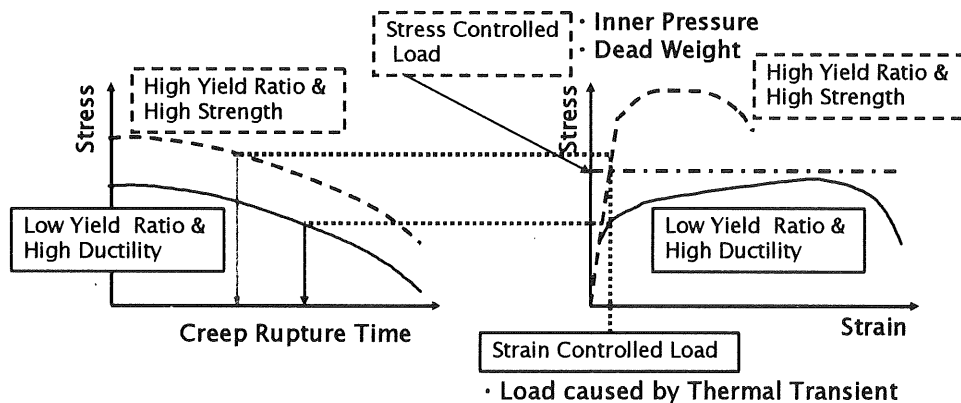


図1 FBR用構造材料に求められる基本的特性

用中の損傷進行予測の不確定幅を抑制できる可能性があることを示している。

さらに LLSFR については、評価の不確定性抑制の観点から以下の2特性が追加される。

(3) 長時間時効後の延性、靱性の確保

延性、靱性の確保は、鉄鋼材料一般に求められることであり FBR 構造材料に限ったものでないが、高温長時間経過後も設計要求を満たす両特性の確保は、FBR プラントの安全論理基盤となる破断前漏えい(LBB)性を寿命中維持するうえから重要となる。

(4) 製造時組織(相)長時間安定性

高合金鋼はオーステナイトやマルテンサイトといった母相を有しているほか、強度特性などの改善を目的に、複数の元素が添加されている。しかし、長時間高温環境下で用いられる材料では、固溶強化のために加えられた元素が析出したり、析出強化を狙った微細な炭、窒化物が肥大化する他、主要な元素の移動や炭化物形成などにより、初期の相が維持できなくなり、結果的に材料特性が大きく変わるこ

とになる。そうした変化は、材料特性データベースに基づき開発された強度評価手法や寿命予測手法の外挿信頼性を損なわせることになるため、可能限り安定に組織が保たれ、材料特性が劇的に変化しない材料が望まれる。そのため、実際の材料開発では加速熱時効後の仔細な組織分析、析出物解析を実施するとともに、材料試験から取得可能な特性の中で組織変化に比較的敏感に影響を受ける延性(破断伸び)に基づく指標の開発を試みている。

3. 開発目標の設定

LLFSR 用高クロム鋼開発に着手するに当たり、プラント設計作業および構造健全性評価技術の高度化と並行して構造材料開発が行なわれることから、前節で述べた基本的な要求事項のほかに、実際にプラントを設計、構造健全性を評価する側からの要求を調査したうえで詳細な開発目標を定めている。設計側、構造評価側との緊密な連携は、材料開発目標をより具体化できるばかりではなく、並行し

表1 高速増殖炉用高クロム鋼開発目標一覧

	評価項目	重要性	SUS410J3	候補-1(W中添加)	候補-2(W無添加)
①	短時間強度 ≧1.2・Mod 9Cr-1Mo鋼		×	○	×
②	クリープ強度 ≧SUS304 550°C、10 ³ h以上域		○	◎	○
③	クリープ破断延性 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼	●	△	○	◎
④	疲労強度(高温) ≧Mod 9Cr-1Mo鋼		○	未試験	○
⑤	クリープ疲労強度 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼	●	○	○	○
破壊力学特性					
⑥	(1)高温破壊靱性 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼	●	×	×	△
	(2)熱時効後の高温破壊靱性 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼	●	×	△	△
⑦	切欠き感受性 切欠き強化であること		○	○	○
⑧	冷却材との共存性		○	—	○
⑨	過渡熱負荷低減 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼	●		○	
⑩	溶接施工法確立の見通し		○	○	○
⑪	溶接性 ≧母材高温強度		○	試験中	
製作性(厚肉板、薄肉伝熱管の間の材料特性のばらつき)					
⑫	(1)短時間強度 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼		—	○	○
	(2)長時間強度 ≧Mod 9Cr-1Mo鋼		○	○	○
⑬	製造費用の抑制		—	—	—
⑭	高価元素の不使用		当面評価せず		
⑮	高温長時間における組織安定性	●	△	○	○

※評価 ◎：十分目標値を達成、○：目標値を達成、△：取得データの一部は目標値を達成、×：未達成

て進められる設計評価や改良される構造健全性評価手法に必要な材料情報を提供し、材料開発途中においても対象材料を適用した設計評価を可能とし、得られた結果や評価結果に基づく新たな要求を直接材料開発に反映できる長所がある。定めた評価項目を表1に示す。表中の評価項目欄の下段は開発目標値を示している。また、FBR 構造材料として特に重要である項目については、既述の基本思想に基づき重要性の欄に●で示している。なお、選定評価項目のうち、費用に関する内容、製造費用の抑制および高価な元素使用については、材料開発における技術課題が解決し、商用材料としての見通しが得られた時点で評価することとした。

4. 高速増殖炉用高クロム鋼開発現状

前節までに紹介した基本的な開発思想を踏まえ、かつ表1に示した各開発項目の目標値達成に向けた研究開発を実施している。ここでは、その現状を報告する。

4.1 FBR 用 1 2 Cr 鋼の開発現状

開発に当たり、既存規格化鋼種のなかで最も目標に近い材料として、火力プラントで実績がある火 SUS410J3 を選択している。これは、豊富なデータを開発材の比較参照とするだけでなく、材料の組成が近く同組織(この場合は焼き戻しマルテンサイト相)の鉄鋼材料の特性は短時間特性間の比較評価に基づき類推できること[4]を考慮したものである。これにより、開発途中においても長時間域特性を一定の信頼性を持って予測することが可能となり、かつ開発材料の特性が持つばらつきの下限を同鋼の蓄積データに基づき示すことができる。すなわち、データのばらつきが大きい開発段階においても保守側のデータを適用する制限はあるものの特性の不確定性に基づくリスク顕在化を抑制できる。さらに、開発項目の目標値に対する火 SUS410J3 鋼の特

性を評価することにより、重点的な開発項目を明確に把握できる。表1の同鋼の評価欄に結果(○、×等)を示した。この結果に基づき、①クリープ破断延性、②破壊力学特性および③高温長時間における組織安定性の改善が材料開発の重点項目であることが分かる。表2に同鋼の化学組成を示す。重点開発項目の改善に最も大きな効果を持つ要因として、主要な構成元素の働き、鋼中の挙動に注目した評価を行なっている。評価に基づき W および Mo の組成を以下のモリブデン当量式で最大組成を 1.5wt% とした改良仕様材を製作した。

$$\text{Mo 当量} = [\text{Mo}] + 0.5[\text{W}], \quad [] : \text{化学組成(wt\%)}$$

特性改善試作材の仕様を表2に合わせて示した。試作材は、両元素の効能が明らかとなるように、W を火 SUS410J3 の 1/3 程度添加した材料(以下 W 中添加材)および W を全く添加しない材料(以下 W 無添加材)とした。3 鋼種の 600°C、6,000 時間時効前後の衝撃特性を図2に示す。図2(1)は時効前の試験結果であるが、これらの3 鋼種の間には大きな差は認められない。一方、図2(2)に示した時効後の試験結果では多量の W を含む火 SUS410J3 の低下が他の2 鋼種に比して大きくなっていることが分かる。図3には時効後のそれぞれの材料組織の SEM 観察結果を示した。写真に白く見える析出物は組織分析の結果 Laves 相であることが分かっている。Laves の時効後の析出様相は W 組成が高いほど顕著であり、この観察結果は別途実施した化学分析と整合している[5]。これらの試験および分析結果から、時効後の靱性、延性確保には W と Mo 組成比の最適化が有効であるとの知見を得ている。並行して進めている析出強化元素の最適化も含め[6]、こうした添加元素の効能を供用中保つことができれば、材料が初期に持つ特性維持、あるいは緩やかな特性の経時変化が期待でき、想定プラント寿

表2 既存 12Cr 鋼および開発材料の化学組成 (wt%)

	C	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Cu
SUS410J3	0.07-0.14	≤0.7	≤0.5	10.5-12.5	0.25-0.65	1.5-2.5	0.15-0.3	0.04-0.1	0.04-0.1	0.3-1.7
W中添加	0.10-0.14	≤0.7	0.5-0.8	9.5-11.0	1.0-1.30	0.30-0.40	0.10-0.30	0.04-0.08	0.02-0.05	<0.10
W無添加	0.10-0.16	≤1.0	≤1.0	10.0-11.0	1.30-1.60	—	0.12-0.22	0.03-0.08	0.03-0.07	≤0.15

命に比して短時間のデータベースに基づいても設計評価や寿命評価の外挿信頼性を確保できる(評価の不確定性の抑制)。

特性改善を狙った試作材の開発目標に対する評価を表1に示した。今後、破壊靱性等一部の特性改善を図る必要は残るものの現状でほぼ開発目標を達成できる見通しをえていることが分かる。

図4に開発材の熱過渡耐性、比高温強度を他の既存有力構造材料と比較して示した。現時点での実力によれば、高温環境専用に開発されたオーステナイト鋼や同種の改良9Cr鋼より優る特性、熱的特性と高温強度のバランスに優れていることが分かる。これは供用中の支配的な負荷となる熱応力の発生を抑制する機能に優れることを示しており、材料に基づく不確定性の1つである使用環境の不確定性の影響を他鋼種より緩和できる能力が相対的に高いことも表している。

4.2 開発材料導入による効果評価

開発途中ではあるが、FBR用12Cr鋼を現在進めているFSの実用化高速炉へ適用した結果を図5に示した。設計によれば、SUS304を1次系に適用している高速増殖原型炉もんじゅに比べ、大幅な配管短縮が実現でき、試算では、前者が高所水平引回しなどにより3.9m必要であったのに対し、熱過渡耐性に優れる12Cr鋼では1.2mに短縮できる見通しとなっている。また、同様に熱膨張対策のために設けられたエルボの数も前者では1ループ当たり9箇所あったものが、1箇所まで軽減できる設計となっている。こうした構造の簡略化は単なる物量削減のみに止まらず、冷却材流況と構造物との連成を取り扱う健全性評価や長時間稼動において重要となる溶接箇所の軽減をもたらすことから材料に基づくリスク軽減を実現するものとして評価できる。

5. 結言

開発途中にある先進プラントを対象とした、構造材料開発の現状をまとめた。対象プラントにおける構造材料への要求が明確であることに着目して、本来材料が有する不確定性から発現するリスクの軽減を目的とした材料開発を試みている。現状で得た知見は以下のようにまとめられる。

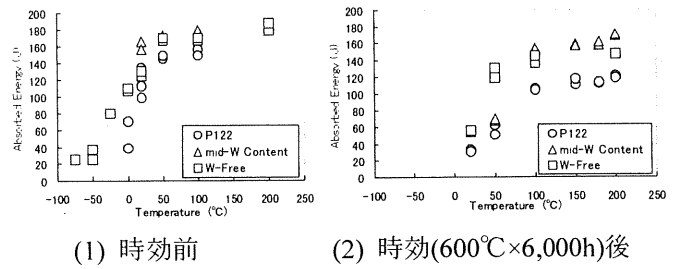


図2 高クロム鋼の時効前後における衝撃特性の変化

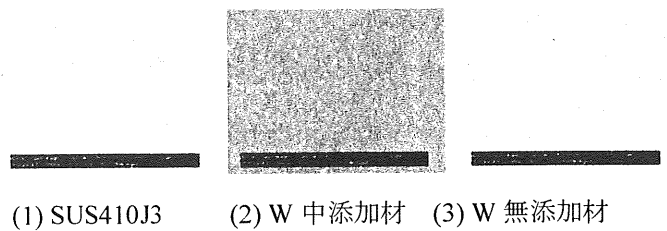


図3 時効後12Cr鋼のSEM組織観察結果

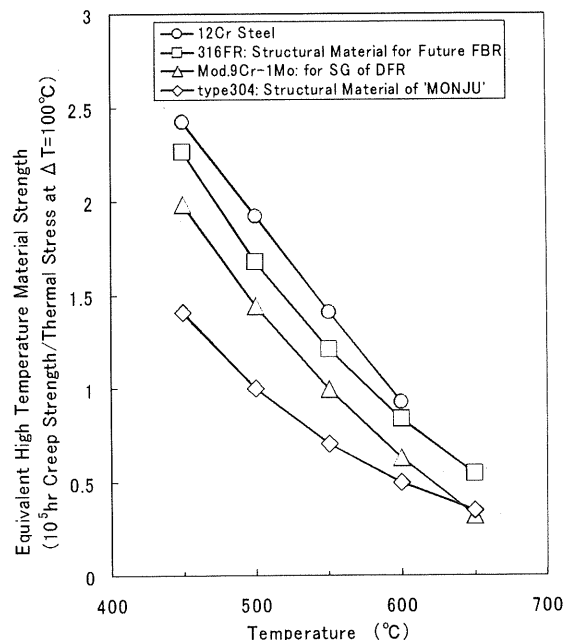


図4 主要な高温構造材料の熱過渡耐性の比較

- (1) 材料に基づく不確定性を、材料特性のばらつき、使用環境の不確定性および評価の精度に区分し、材料開発側からの軽減を試みた。
- (2) 対象プラントの支配的な負荷形態に対する耐性を適切に評価できる指標を設定することや負荷を生じる過渡事象に鈍感な材料設計を行なうことで、負荷の発生軽減を実現するばかりではなく、評価を左右する環境条件の変動による影響を抑制することが可能となる。
- (3) 限定した観察結果ではあるが、高クロム鋼の主要な構成元素を最適化することで長時間熟時効後も安定な材料組織を保つ材料開発の見通しを得た。そうした材料の実現により、プラント寿命より短時間のデータに基づく寿命評価法や設計手法であっても、その外挿信頼性を確保できることになる。
- (4) 材料特性のばらつきが大きくなる開発途中においても、同じ組織を有する類似仕様の既存材料を参照することで、保守側に偏るものの評価結果への材料特性のばらつき(不確定)の影響を軽減できる。
- (5) 試作段階ではあるが、FBR 用 12Cr 鋼を適用した場合、既存オーステナイト系耐熱鋼を適用した原型炉と比較して、大幅な物量軽減、構造簡素が実現できる見通しを得た。

謝辞

本報告内容におけるモリブデン、タングステンの最適組成検討を中心とする評価作業は、検討に供した試験データも含め、経済産業省からの受託研究によって行なわれた。

参考文献

- [1] 辻禎之、"材料リスク(材料と社会)に関する調査"、(社)未踏科学技術協会、材料・システム安全研究会講演会、東工大、8月(2004)
- [2] "特集 高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズⅡ中間取りまとめ"、サイクル機構技報、No.24 別冊(2004)

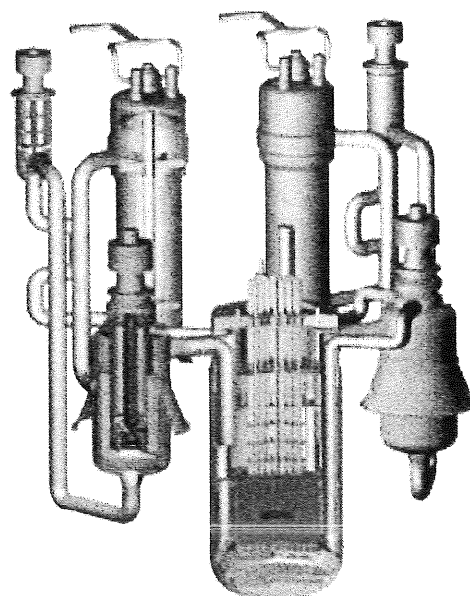


図5 12Cr 鋼を 1 次系構造材に適用した LLSFR 概念[2]

- [3] Y.Sakamoto, S.Kotake, and et al., "PROMISING FAST REACTOR SYSTEMS IN THE FEASIBILITY STUDY ON COMMERCIALIZED FR CYCLE SYSTEMS," ICONE13-50613, Beijing, May(2005).
- [4] 青砥紀身、和田雄作、「既存鋼種とのアナロジによる新規開発材料の高温材料特性評価手法」、日本機会学会論文集 第 523 号 A 編 (1990)17-22.
- [5] T.WAKAI, K.AOTO, M.SUKEKAWA, S.DATE, K.INOUE, "The Present Status of Development of High Chromium Steel for FBR", Proc.30th MPA seminar(2004) 28-1~28-14.
- [6] T.ONIZAWA, T.WAKAI, M.ANDO and K.AOTO, "Effect of V and Nb contents on mechanical properties of high Cr steel", Proc.Creep and Frac. in High Temp. Comp.-Design & Life Assess(2005), to be appeared.