第２章　　研究計画の設定経緯

第２章　研究計画の設定経緯

(1) 高速増殖炉と軽水炉の仕様と材料

高速増殖炉実証炉の主要仕様及び機器別の材料を原型炉“もんじゅ”及び軽水炉と比較して表 2-1 に示す[2-1]。高速増殖炉の原子炉出口温度は，軽水炉では高々300℃程度であるのに対し，500℃以上と高くなっている。一方，原子炉容器の運転圧力は軽水炉の場合，機種により異なるが，約 70kgf/cm^{2}から約 160kgf/cm^{2}と高圧であるのに対し，高速増殖炉では沸点の高いナトリウムを冷却材として用いているため加圧する必要がなく，高々数 kgf/cm^{2}程度である。また，蒸気温度も原子炉出口温度に対応して，軽水炉が 300℃以下であるのに対し，高速増殖炉では 500℃近くと高温になっている。

高速増殖炉では上記のように，機器の使用条件が高温となるためクリープを考慮すべき温度領域に入ること，及び冷却材ナトリウムの熱容量が小さく熱過渡時の温度変化量及び変化速度が大きく，熱応力が大きくなることから，使用材料には優れた高温強度が要求される。さらに，冷却材であるナトリウムとの共存性が要求されるほかに，当然のことながら成型・加工性，溶接性，信頼性，経済性等も重要となる。これらの高速増殖炉高温機器用材料に要求される諸条件をまとめて表 2-2[2-1]に示す。原型炉ではこれらの諸条件を考慮して，原子炉容器等の主要機器に対しては高温強度に優れたＳＵＳ３０４鋼が使用されており，また蒸気発生器用材料としては，耐 SCC 性に優れた２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（蒸発器）及び耐 SCC 性と高温強度に優れたＳＵＳ３２１鋼（過熱器）が用いられている。

(2) 実証炉に採用する新材料

実証炉では経済性の観点から高効率化を図るため，原子炉出口温度を原型炉に比べて約 20℃高くしたことから，さらに高温強度特性の優れた材料を原子炉容器等の主要機器に採用する必要がある。また，蒸気発生器は，原型炉では蒸発器と過熱器から構成されているが，実証炉では蒸発器と過熱器をシステム合理化の観点から一体化した一体貫流方式を採用することから，耐 SCC 性と高温強度を兼ね備えた材料が必要となる。

以上のような条件を満足する新材料として，原子炉容器等の１次系高温機器には３１６ＦＲ鋼を，蒸気発生器には改良 9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼をそれぞれ採用することとしている。以下に，これら新材料の選定の考え方，材料の特徴及び試験計画設定の考え

方について述べる。

［参考文献］

[2-1] UETA, M., et al; "The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor", The 13th SMiRT, Porto Alegre, Aug., (1995), Vol.1, Div.E, p.359

表 2-1　高速増殖炉と軽水炉の仕様及び材料比較[2-1]

項目＼原子炉		高速増殖炉				軽水炉			
		FBR実証炉		もんじゅ		BWR		PWR	
仕様	電気出力（MWe）	約 600		約 280		357～1100		340～1180	
	原子炉出口温度(℃)	550		529		約 280		約 320	
	原子炉出入口温度差(℃)	155		132		約 60		約 30	
	原子炉容器の運転圧力（kgf/cm²）	約 2		約 1		約 70		約 160	
	蒸気温度（℃）	495		483		約 280		約 274	
	蒸気圧力（atg）	169		127		約 70		約 160	
材料	原子炉容器	316FR		SUS304		低合金鋼(SQV2A)		低合金鋼(SQV2A)	
	配管	1次系	316FR SUS304	1次系	SUS304	ステンレス鋼(SUS316NG) 炭素鋼(STS40)		1次系	ステンレス鋼(SCS14A)
		2次系	SUS304	2次系	SUS304			2次系	ステンレス鋼(SCS14A) 炭素鋼(STS40)
		水蒸気系	低合金鋼 炭素鋼	水蒸気系	低合金鋼 炭素鋼				
	中間熱交換器	316FR		SUS304		——		——	
	蒸気発生器	改良9Cr-1Mo		EV	2¼Cr-1Mo	——		インコネル（伝熱管）	
				SH	SUS321				

表 2-2　高速増殖炉高温機器用材料に要求される諸特性[2-1]

（1）高温強度に優れていること。 （引張強度，疲労強度，クリープ疲労強度，延性） （2）ナトリウムとの共存性に優れていること。 （耐食性，質量移行特性等） （3）ナトリウム及び水蒸気環境下での特性が良好であること。 （4）成形加工性，溶接性に優れていること。 （5）材料の仕様実績，信頼性のあること。 （6）経済性に優れていること。

2.1　改良９Ｃｒ－1Ｍｏ鋼

2.1.1　対象材料選定経緯

図2.1.1-1に示すように，原型炉“もんじゅ”では蒸気発生器用材料として，蒸発器に２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼を，過熱器にＳＵＳ３２１鋼を使用しているが，実証炉ではプラントコスト低減の観点から一体貫流型蒸気発生器を採用するため，高温強度と耐SCC性の優れた改良９Ｃｒ－1Ｍｏ鋼を採用する方針である。

蒸気発生器は液体ナトリウムと水との間で熱交換を行う機器であり，ナトリウム－水反応防止の観点より，管及び管－管板継手部の健全性と信頼性に関する要求は厳しく，高温強度，耐食性，長時間組織安定性に優れ，質量移行が少なく，溶接性の良好な材料が要求される。

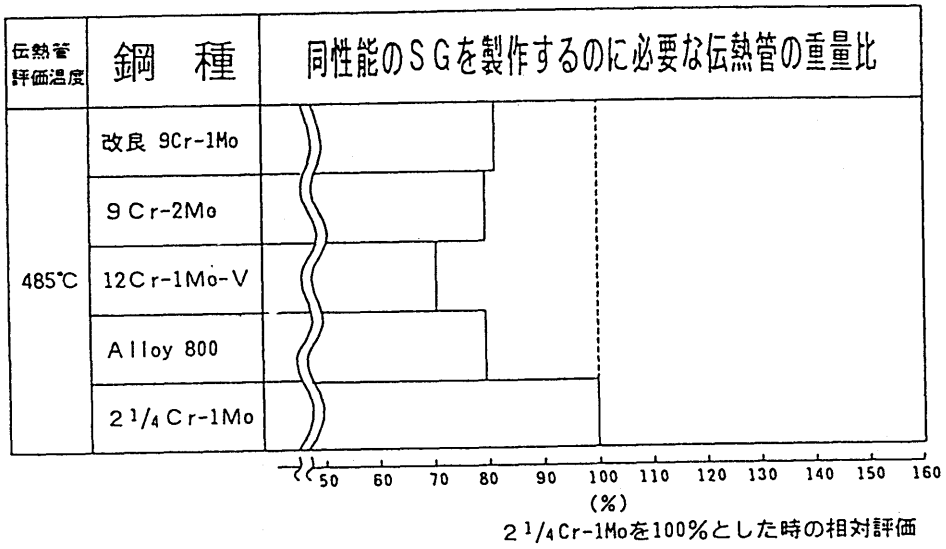
蒸気発生器伝熱管の候補材選定はフェライト系鋼（２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ，９Ｃｒ－１Ｍｏ系，９Ｃｒ－２Ｍｏ系，１２Ｃｒ系）及びオーステナイト系鋼（１８Ｃｒ－８Ｎｉ系，２２Ｃｒ－３２Ｎｉ系）を対象として行われた。その結果，要求を満たす材料として，ＡＳＭＥで基準化の動きがあった改良９Ｃｒ－1Ｍｏ鋼，火力での使用実績が多い９Ｃｒ－２Ｍｏ鋼，１２Ｃｒ－１Ｍｏ－Ｖ鋼のフェライト系鋼，及び高温強度及び耐SCC性が高いAlloy８００のオーステナイト系鋼が候補として選定された[2.1-1]。

蒸気発生器伝熱管の候補材料として実施したスクリーニング試験，及び想定されている使用温度域での各鋼種毎の物量比較の結果から，表2.1.1-1に示すように，９Ｃｒ系鋼が強度，延性，靭性，溶接性で総合的に優れており，蒸気発生器用材料として有力であるとの結論を得た[2.1-2]。

さらに，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼，９Ｃｒ－２Ｍｏ鋼，９Ｃｒ－１Ｍｏ－Ｖ－Ｎｂ鋼の９Ｃｒ系鋼を対象とした検討が行われ，図2.1.1-2に示すように，他の９Ｃｒ系鋼に比べ高温強度が優れている改良 9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼が実証炉蒸気発生器用の最有力候補と判断された。また，別途実施された原電・核燃料サイクル機構（旧動燃）共研による「改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼を用いた一体貫流型蒸気発生器の熱過渡試験」で改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼伝熱管溶接部の健全性が確認された[2.1-3]。

表 2.1.1-1　蒸気発生器伝熱管候補材料の特性比較

鋼種	適用範囲（℃）（ＳＧ入口温度目安値）	材料特性（実証炉条件） 強度	延性	溶接性	コスト
2 1/4 Cr-1Mo鋼	＜ ４７０℃	×	○	◎	◎
９Ｃｒ系鋼	＜ ５２５℃	○	◎	◎	○
12Cr-1Mo-Ｖ鋼	＜ ５２０℃	○	×	×	○
Alloy 800	≦ ５５０℃	◎	○	○	×



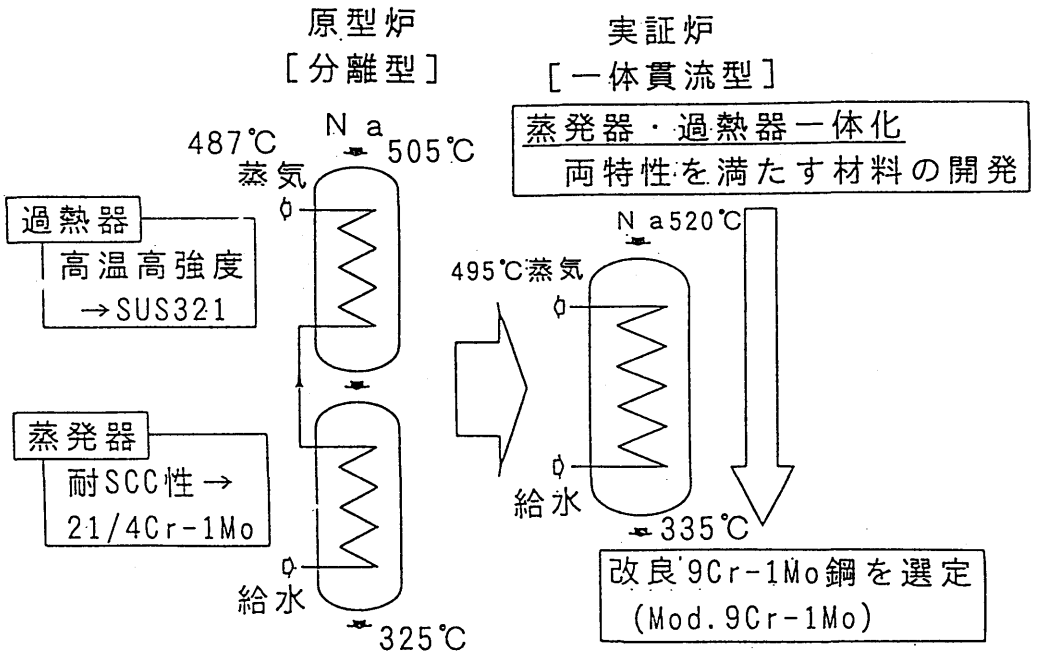


図 2.1.1-1　　高速増殖炉蒸気発生器用材料

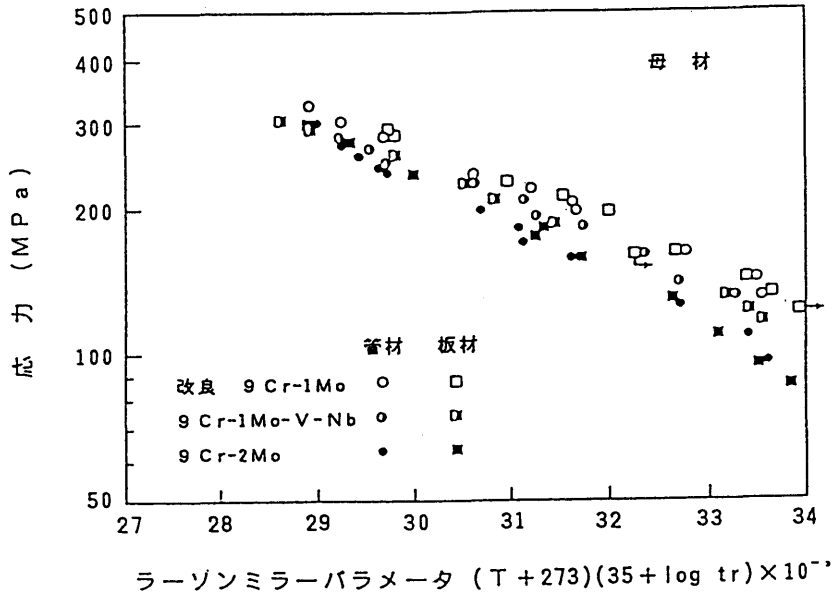


図 2.1.1-2　　９Ｃｒ系材料のクリープ破断強度の比較

2.1.2　対象材料の特徴

改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼は，米国ＤＯＥの要請により，ＯＲＮＬが中心となり高速炉蒸気発生器用材料として研究開発された材料である。材料の成分設計に際しては，Ｃｒ量が8～14%の各種フェライト系鋼，オーステナイト系ステンレス鋼及びＮｉ基合金など数多くの材料の化学成分組成を十分調査した上で最適な成分バランスが選定されている。

化学成分の特徴は，従来の９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼（ASTM A387-G9，ASTM　A213-T9）に対して，微量の合金元素Ｖ(0.18～0.25%)及びＮｂ(0.06～0.10)が添加されたこと，Ｎｉ(0.40%以下)及びＮ(0.030～0.070%)の含有量が制限されたことである。

Ｖ及びＮｂの添加効果としては，析出強化（もしくは微細分散強化），Ｖによる炭化物の粗大化遅延効果，及びＮｂによる細粒化効果がある。

析出強化は，オーステナイト域での焼ならしにより溶体化されたこれらの元素が，焼もどしで再析出したＶＮ等の微細析出物によりもたらされる。これら微細析出物と運動転位間の相互作用は，引張強度及びクリープ強度向上に有効に働く。微細分散強化は，焼ならしでの溶け残りＮｂ炭窒化物を核としてＶ炭窒化物が翼状に析出した複合析出物によると考えられている[2.1-4]。複合析出物の透過電子顕微鏡写真を図 2.1.2-1 に示す。この複合析出物は高温長時間でも安定であることが確認されている[2.1-4]。600℃時効における時効時間と複合析出物の翼の長さ（Dp）の関係[2.1-4]を図 2.1.2-2 に示す。時効中全く長さ変化が見られない。また，これら複合析出物中へのＣｒの含有は極めて少ない[2.1-4]。

Ｖによる炭化物の粗大化遅延化効果は，主としてＦｅとＣｒを主体とした$M_{23}C_6$系炭化物中にＶが固溶し，この炭化物の粗大化を抑制する効果である[2.1-5]。これにより，焼もどしによって形成された微細な$M_{23}C_6$系炭化物による析出強化が長時間にわたって期待できる。

ＮｂによるオーステナイトＮ粒細粒化効果[2.1-6]により，焼もどしマルテンサイト鋼にもかかわらず本鋼は極めて良好な靭性が得られる。

改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼製造における熱処理は，オーステナイト域で十分に合金元素を溶体化させた後冷却する焼ならし（空冷）もしくは焼入れ（水冷却）で微細マルテンサイト組織を得るプロセスと，それに続く焼もどしプロセスとに分けられる。温度範囲は以下に示す通りである。

・焼ならし（焼入れ）　：1040～1095℃（ただし管では上限規定なし）

・焼もどし　　：730℃以上

改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の規格機械的性質を表2.1.2-1に示す。表中に示すように，従来の９Ｃｒ-１Ｍｏ鋼（ASTM A387-G9-c1.2，ASTM A213-T9-c1.2）に対し，耐力，引張強度ともに高い規格値を有している。これは主として，上述したＶ，Ｎｂの効果である。

このような改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼のクリープ及びクリープ疲労強度は，原型炉の蒸発器材料である２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼を大きく上回り，かつＳＵＳ３０４鋼とほぼ同等レベルである。また，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の溶接性に関しては，耐高温割れ性は２．２５Ｃｒ-１Ｍｏ鋼なみであり，水素割れも適切な予熱及び後熱処理により防止できる。

表2.1.2-1　改良9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼の機械的性質（ASTM鋼板規格値）

鋼　種	引張性質		
	耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)
改良 9Cr－1Mo 鋼(ASTM A387-G91)	≧415	585～760	≧18
9Cr－1Mo 鋼(ASTM A387-G9-c1.2)	≧310	515～690	≧18

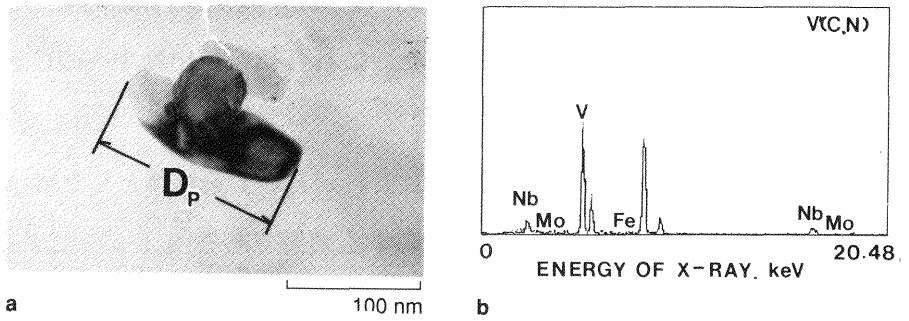


図2.1.2-1 焼ならし＋焼もどし後に見られるNb及びVの複合析出物[2.1-4]

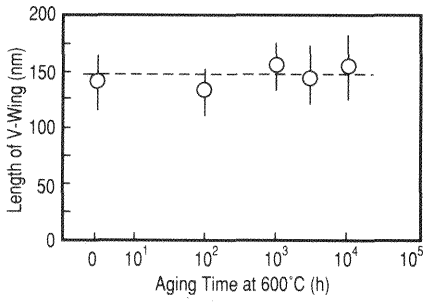


図2.1.2-2 Nb及びVの複合析出物の翼長（Dp）と600℃時効時間との関係[2.1-4]

2.1.3　試験計画の設定

(1)　概要

蒸気発生器は高速増殖実証炉で最も重要な機器の一つとして，高温の２次系ナトリウムから水及び水蒸気に熱を伝える重要な役目をになっている。高温材料特性とともに，水及び水蒸気に対する耐食性が要求される。使用材料，特に伝熱管には水側での耐SCC性，伝熱性能等を考慮するとフェライト系の材料が望ましい。

高速増殖実証炉の蒸気発生器用材料の研究は昭和 57 年度から３ヵ年にわたり電気事業連合会での委託研究・共同研究「高速炉構造新材料に関する調査研究」が実施され，蒸気発生器用の有力候補材料として９Ｃｒ系鋼が選定された[2.1-1，2.1-2]。

その結果を受けて，溶接協会ＦＳＧ小委員会において，９Ｃｒ系鋼の高速増殖炉への適用性検討を目的とした研究が発足した。本研究では，①材料の絞り込み及び材料・溶接材料の仕様検討，②材料強度基準用データ取得計画及びデータ蓄積･高温強度特性（溶接部を含む）の把握，③クリープ疲労評価法の検討，及び④溶接部強度評価法の検討 を行うことにし，以下の４段階で研究を推進した。

・第１次研究：昭和６０年～昭和６３年
  ・９Ｃｒ系鋼からの，一体貫流型蒸気発生器用最適材料及び溶接材料の選定
    （最適候補材料として改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼を選定）
  ・材料強度基準策定用データ取得計画策定
・第２次研究：平成元年～平成３年
  ・米国エネルギー省（DOE）との共同研究を通じて，米国長時間データを入手
  ・米国からの入手データの評価及び国内での比較対照試験の実施
  ・クリープ疲労評価法検討用試験計画策定と試験の実施
・第３次研究：平成４年～平成７年
  ・溶接部強度評価法の検討
  ・長時間クリープ試験の継続
  ・異材継手の研究着手
・第４次研究：平成８年～平成１０年
  ・材料強度基準の策定と根拠データの整備
  ・クリープ疲労評価法及び溶接部強度評価法の妥当性検討
  ・長時間クリープ試験継続及び長時間クリープ疲労試験開始

(2) 試験計画の立案

以下に各課題に対する試験項目の考え方，試験条件設定の考え方について示す。

a. 候補材料の絞り込み

従来研究の成果を踏まえ，９Ｃｒ系鋼に材料を絞り，国内外の研究開発状況を調査するとともに，実証炉蒸気発生器に適用する場合の問題点を摘出して，絞り込みのための試験計画を策定した。

調査は９Ｃｒ系鋼である，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼をはじめ，９Ｃｒ－１Ｍｏ－Ｖ－Ｎｂ鋼，９Ｃｒ－２Ｍｏ鋼，９Ｃｒ－２Ｍｏ－Ｖ－Ｎｂ鋼，９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の５鋼種を対象とし，それぞれの母材，溶接材料，溶接継手について，板，管，鍛造材の区分別に，諸強度特性，環境特性等に関して，国内外の公開情報，核燃料サイクル機構（旧，動燃）及びメーカ所有の資料などを基にして調査を実施した。

これらの調査を基にして絞り込みのための試験計画を策定し，母材及び溶接材料の材料特性試験を行い，候補材料の絞り込みを行った。実施した試験条件を表 2.1.3-1～表 2.1.3-3 に示す。ＳＲ条件は実証炉の溶接部位で予想される最大加熱時間 8.4 時間を主体とした。これら試験結果と調査結果から改良 9Ｃｒ－1Ｍｏ鋼が候補材料として，また９Ｃｒ－２Ｍｏ鋼がバックアップ材として選定された。以後の，試験計画は改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼を対象としたが，一部特殊試験については９Ｃｒ－２Ｍｏ鋼を計画対象とした。

b. 材料強度基準の策定

改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の高速増殖炉への適用性検討と適用化のための重要課題である高温強度特性の把握と実証炉用材料強度基準の策定に必要な試験項目とヒート数･データ量を設定した。計画では，データが少なく，特性把握が不十分であった溶接部の高温強度特性も把握できるようにした。

試験条件設定にあたっては，表 2.1.3-4 に示すように，各試験項目を試験区分（許容値策定用，許容値バックアップ用，材料特性確認検証用）に分類した。なお，ＦＳＧ小委員会の試験範囲は大気中試験とし，環境効果については対象外とした。更に表 2.1.3-5 に示すように許容値策定に必要な材料ロット数･試験データ数を算定し，他研究機関の取得済みデータを勘案した上で取得計画を策定した。なお，１ロット当りの試験数算出根拠は表 2.1.3-6 の通りである。また，許容値策定の中心

的試験項目であるクリープ，疲労については，表 2.1.3-7 にような考え方で試験条件を設定した。極力長時間試験を計画し，一部の試験は平成 10 年現在も継続実施しているが，クリープ疲労試験では極力低ひずみのデータが得られるようにした。これら計画は，その後のデータ取得による材料挙動結果を考慮して見直しを行ってきた。その見直し計画により，現状で取得した試験の総データ量を表 2.1.3-8 に示す。

また，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼はＡＳＭＥで規格化されてはいるが，国内ではまだ規格化されていない材料である。一方，発電設備に使用される材料は「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（通商産業省告示第 501 号)」に定められている。したがって，軽水炉で使用される温度範囲では告示 501 が適用されるため，技術基準の改正等について検討されている委員会に本鋼を提案し，その意見を反映させることが重要と考えられた。また，前述の調査結果からは物性値に関するデータの不足も提示された。そこで，材料強度基準用試験計画で漏れている物性値や高サイクル疲労データの取得を計画し（表 2.1.3-9)，基準化の一環として告示５０１号へ本鋼を提案する準備をすることとした。

c.　クリープ疲労評価法の検討

高速増殖炉は冷却材として高温の液体ナトリウムを使用するため，機器の起動停止に伴う繰返し熱応力と運転中の高温保持によるクリープが重畳したクリープ疲労損傷が支配因子となる。そこで，実機設計法への反映･バックアップを目的として，クリープ疲労評価法に関する検討を行った。

同時に，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の開発母体である米国ＯＲＮＬ所有の長時間データの活用を目的に実施した，日本原子力発電株式会社と米国エネルギー省（DOE）との共同研究「改良９Ｃｒ鋼の基準化に関する研究」を通じ入手した米国のデータを分析・評価するとともに比較対照試験として各種高温強度の国産材データの取得・評価を計画立案した。DOE から入手した内容及びそれに対する対応の考え方を表 2.1.3-10 に示す。このなかで，４項目について，国内での比較対照試験を計画した。比較対照試験内容・条件及び DOE での実施内容を表 2.1.3-11 に示す。比較対照試験はクリープ疲労評価法及び溶接部強度評価法に係わるデータの取得が主体である。

クリープ疲労評価法の検討に関する試験条件を表 2.1.3-12～表 2.1.3-16 に示す。実機で重要な長時間・低ひずみ範囲のクリープ疲労試験として表 2.1.3-12 に示すような条件を計画した。その後さらに，550℃-1%でひずみ速度 0.0001%/s の条件を２本，550℃で 1%-10 時間保持，0.5%-5 時間保持を計画した。また，引張ひずみ台形波以外にも実機で想定される中間保持試験を計画した（表 2.1.3-12)。

クリープ疲労評価法として従来の時間消耗則だけでなく延性消耗則の適用性が評価できることも考慮し，関連する試験を計画した。低速度繰返し変形挙動試験（表 2.1.3-13），応力緩和試験（表 2.1.3-14)，ステップ状変動応力下のクリープ試験によるロビンソン則成立性確認試験（表 2.1.3-15)，繰返し軟化後のクリープ試験（表 2.1.3-16）を計画した。

クリープ疲労ではないが，高温設計手法に係わる多軸場での特性確認試験として，内圧クリープ破断試験（表 2.1.3-17)，多軸変形挙動試験を計画した（表 2.1.3-18)。

d. 溶接部強度評価法の検討

溶接部強度評価法の検討に関する試験条件を表 2.1.3-19～表 2.1.3-22 に示す。

継手試験片を母材部・熱影響部・溶接金属部の力学的結合体として強度評価する２及び３要素モデルにおいて必要となる各部の疲労特性及びクリープ特性の取得試験を計画した。当初は，改良９Cr－１Mo 鋼の熱影響部の占める領域は比較的短く継手構造物としては母材及び溶接金属が支配的になると考え，溶接金属及び溶接継手を対象に計画した（表 2.1.3-5 参照)。

また，溶接部強度評価法として特に重要なクリープ疲労に関しては表 2.1.3-19 に示す条件を計画した。この表に示す板曲げ試験は，大型板状試験片を用いて曲げ荷重を負荷する実機により近い試験として計画した。この結果は，溶接部強度評価法の検証に用いられた。３要素モデルによる強度評価法の確認を目的に，熱処理により作製した熱影響部相当材（表 2.1.3-20)を用いたクリープ試験及疲労試験を計画した。

さらに，実証炉では改良９Cr－１Mo 鋼配管とＳＵＳ系鋼配管との接合が存在するため，改良９Cr－１Mo 鋼とＳＵＳ３０４鋼との異材継手を対象にした施工法の検討及び高温強度特性の把握を計画した（表 2.1.3-21a，表 2.1.3-21b)。

e. その他

改良９Cr－１Mo鋼は２次系の水・蒸気環境で使用される。フェライト系材料はオーステナイト系ステンレス鋼に比較し耐SCC性は良好と考えられ，さらに改良９Cr－１Mo鋼は従来材料である２．２５Ｃｒ－１Ｍｏ鋼よりも水・蒸気環境には優れていると考えられているが，改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼のSCCデータとしてはほとんど見られなかった。

また，海外の高速増殖炉でSCCが発生した経験もあり，高温水及び蒸気中での耐SCC確認試験を計画した（表2.1.3-22）。

［参考文献］

[2.1-1] 馬場；“高速炉構造新材料に関する調査研究”，火力原子力発電，Vol.36，No.1，(1985)，p.45

[2.1-2] 馬場；“高速炉構造新材料に関する調査研究（Ⅱ）”，火力原子力発電，Vol.37，No.6，(1986)，p.64

[2.1-3] Nakagawa, Kanegae；“Evaluation Study on Welded Joints of Mod.9Cr-1Mo Steel Tubes of once-Through Type Sodium Heated Steam Generators,” 4th International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, Oct., 1988, Avington

[2.1-4] K.Tokuno, K.Hamada and T.Takeda；“Dispersion Hardening High-Cr Steels by Forming "V-Wings"”, JOM, Vol.44, (1992), P.25

[2.1-5] 石本，梶谷，馬木，我孫子；“ボイラ用改良型9Cr-1Mo鋼の特徴と実用化”，火力原子力発電，Vol.36，No.9，(1985)，p.931

[2.1-6] Y.Tsuchida, R.Yamaba, K.Tokuno, K.Hashimoto, T.Ogawa and T.Takeda；“BOP Manufacturing and Properties of ASTM A387 Grade 91 Steel Pkates”, MPC-Publication, Vol.31, (1990), p.105

表 2.1.3-1　９Ｃｒ系鋼絞り込み試験内容

区分		検討項目 入熱 (kJ/cm)	SR条件 温度(℃)	SR条件 時間(h)	鋼種	評価項目 組織	硬さ	衝撃	引張	クリープ	疲労
溶接材料	TIG	20～30	710～740	8.4	Mod. 9Cr-1Mo	○	○	○	○		
		10～17		1.0		○	○	○	○		
				8.4	9Cr-1Mo-V-Nb	○*	○	○	○	○	○
					Mod. 9Cr-1Mo	○*	○	○	○	○	○
					9Cr-2Mo	○*	○	○	○	○	○
	SAW	25～35		1.0	Mod. 9Cr-1Mo	○	○	○	○		
				8.4		○*	○	○	○	○	○
	SMAW	20～30		1.0	Mod. 9Cr-1Mo	○	○	○	○		
				8.4		○*	○	○	○	○	○
母材		—		8.4	9Cr-1Mo-V-Nb	○*	○	○	○	○	○
					Mod. 9Cr-1Mo	○*	○	○	○	○	○
					9Cr-2Mo	○*	○	○	○	○	○
			—		Mod. 9Cr-1Mo	○	○	○	○	○	○

＊フェライト量測定

表 2.1.3-2　９Ｃｒ系鋼絞り込み試験条件

No.	試験項目	供試材	試験条件（1供試材当）					
			条件数					
			内容					
1	組織試験	全供試材	マクロ組織				ミクロ組織	
			1				2	
			×1				×100, ×500	
2	硬さ試験	全供試材	硬さ分布（ビッカース）					
			1					
			荷重 10kgf					
3	衝撃試験	全供試材	温度				繰返し数	
			2				3	
			0℃	20℃			—	
4	引張試験	全供試材	温度				繰返し数	
			4				2	
			RT	500℃	550℃	600℃	—	
5	クリープ試験	表2.1.3-1参照	温度				破断時間	
			3				3(500, 550℃)	2(600℃)
			500℃	550℃	600℃		300, 1000, 2000h	300, 1500h
6	疲労試験	表2.1.3-1参照	温度				ひずみ範囲	
			3				3(500, 550℃)	2(600℃)
			500℃	550℃	600℃		0.5, 1.0, 1.5%	0.5, 1.0%

表 2.1.3-3　９Ｃｒ系鋼絞り込み試験内容(継手)

管－管溶接継手

区分	検討項目		評価項目					
	＊1			高温加熱後試験				
	鋼種	SR（温度×時間）	クリープ	組織	硬さ	引張	管状引張	管状疲労
TIG	a	710 ℃×8.4h	○	○	○	○	－	－
	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○	○
	c	715 ℃×8.4h	○	○	○	○	○	○
母材	a	710 ℃×8.4h	○	○	○	○	－	－
	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○	○
	c	715 ℃×8.4h	○	○	○	○	○	○
	b	ＳＲ無し	○	○	○	○	－	－

＊1　aは9Cr－1Mo－V－Nb，bはMod. 9Cr－1Mo，cは9Cr－2Moを示す

鍛造－板溶接継手

区分	検討項目		評価項目				
	＊1			高温加熱後試験			
	鋼種	SR（温度×時間）	クリープ	組織	硬さ	引張	衝撃
ＴＩＧ	a	710 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
	c	715 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
ＳＡＷ	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
ＳＭＡＷ	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
＊2 母材	a	710 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
	b	740 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
	c	715 ℃×8.4h	○	○	○	○	○
	b	ＳＲ無し	○	○	○	○	○

＊1　aは9Cr－1Mo－V－Nb，bはMod. 9Cr－1Mo，cは9Cr－2Moを示す

＊2　板材（胴板）及び鍛造材（管板）（ただしクリープは鍛造材のみ）

表 2.1.3-4　試験計画案作成のための試験区分と内容

環境	試験項目 区分	項目	目的	許容値策定 ・許容値策定のための大気中母材の強度データ	許容値バックアップ ・許容値策定をサポートするための強度データ ・環境効果評価手法を策定するための環境中母材の強度データ	確認・検証 ・溶接継手部の強度特性確認のデータ ・材料の安全裕度・健全性の確認のデータ（雰囲気,時効等）	備考
大気中	許容値策定の為の試験	引張	・許容応力強さの策定	・管又は管相当板，板，鍛造のSR処理母材の強度・変形データ	・母材：板厚，熱処理，時効等の影響データ ・溶着金属：SR材の強度・変形データ	・溶接継手：SR材の強度データ	1) 必要ロット数 ① 引張，クリープ・クリープ破断疲労，クリープ・疲労については，許容値策定及び許容値バック合せて9ロット以上とし，繰返しを含めた総ロット数は13ロット以上とする。 ② 上記以外は特にロット数を限定せず。 2) 鍛造は肉厚の½，¼部のうち弱い方の部分を主対象とする。主対象部の決定は本計画外にて行う。
		クリープ・クリープ破断	・許容応力強さの策定 ・クリープ構成式の策定				
		疲労	・許容ひずみ線図の策定				
		クリープ・疲労	・許容ひずみ線図の策定 ・クリープ・疲労・損傷制限値の決定				
	許容値バックアップの為の試験	応力緩和	・クリープ構成式より算出される応力緩和強さのバックアップ	———	・母材：管又は管相当板，板，鍛造のSR材の応力緩和曲線	・溶着金属： ・溶接継手： } SR材の応力緩和曲線	
	材料の特性把握の為の試験（確認・検証）	衝撃	・材料の靭さを把握	———	———	・母材： ・溶接継手： } SR材	
		高温加熱	・高温長時間使用後の材料組織変化の程度を把握				
ナトリウム中	許容値バックアップの為の試験	引張	・環境効果評価手法の策定	———	・母材：管又は管相当板，鍛造のSR材	・溶接継手：SR材	3) ナトリウム中の腐食・脱浸炭，ウェステージ及び水・蒸気中のSCC，腐食は材料の表面・界面現象を見るものであり，管SR材に限定する。 4) 左記区分は全て標準的試験片を対象としたものであり，コンポーネント試験などによる確認・検証は除く。
		クリープ破断					
		疲労					
		クリープ・疲労					
	材料の特性把握の為の試験（確認・検証）	腐食・脱・浸炭	・材料の安全裕度 ・健全性の確認	———	———	・母材 ・溶接継手 } 管，SR材	
		ウェステージ					
水蒸気中	同上	SCC	同上	———	———	・母材： ・溶接継手： } 管SR材	
		腐食					

表 2.1.3-5　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の試験項目別の試験計画

環境	試験項目	区分	材料 / 熱処理 / TP採取条件 / ロット当りのTP数		母材														溶接金属				溶接継手												ロット数換算	試験の繰返し	総ロット数	評価試験の総試験量
					Tor T相当板			F（最弱部）			F (1/2 or 2/4)		P						TIG	MIG	SMAW	SAW	T−T	T−F	F−P				P−P								
																							TIG	TIG	TIG	MIG	SMAW	SAW	TIG	MIG	SMAW	SAW				
					AR	SR	A	AR	SR	A	SR	A	AR	SR			A		SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR				
					軸 or 圧延方向			切線方向			切線方向		圧延	圧延	直交	圧延			横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横	横				
大気	引張	許容値策定	30本			○			○					○																				3	2	6	180本
		許容値バックアップ	14本		○			○			○		○		○			○	○	○	○														9	1	9	126本
		確認・検証	30本																				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			10	1	10	300本
	クリープ	許容値策定	10本											○																					1	2	3	20本
	クリープ・クリープ破断	許容値策定	22本			○			○					○																					3	2	6	132本
		許容値バックアップ	16本								○								○	○	○	○														5	1	5	80本
	クリープ破断	許容値策定	4本											○																					1	2	2	8本
		確認・検証	16本																				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			10	1	10	160本
	疲労	許容値策定	32本			○			○					○																					3	2	6	192本
		許容値バックアップ	12本	○			○			○			○				○		○	○	○	○														10	1	10	120本
		確認・検証	12本																				○	○												2	1	2	24本
	クリープ・疲労	許容値策定	36本											○																					1	2	2	72本
		許容値バックアップ	13本	○			○			○			○						○	○	○	○														7	1	7	91本
		確認・検証	13本																				○	○												2	1	2	26本
	応力緩和	許容値バックアップ	12本						○					○																					2	1	2	24本
		確認・検証	4本																○	○	○	○		○												5	1	5	20本
	衝撃	確認・検証	18本						○		○			○	○									③	③	③	③	③								9	1	9	342本
	高温加熱 引張	確認・検証	120本				○			○		○					○						○	○	○	○	○	○								10	1	10	1200本
	高温加熱 じん性	確認・検証	135本				○			○		○					○							③	③	③	③	③								9	1	9	2565本
ナトリウム	引張	許容値バックアップ	32本			○								○																					1	1	1	32本
		確認・検証	8本																				○	○			○				○				4	1	4	32本
	クリープ・破断	許容値バックアップ	16本			○																													1	1	1	16本
		確認・検証	16本																					○											1	1	1	16本
	疲労	許容値バックアップ	16本			○																													1	1	1	16本
		確認・検証	12本																					○											1	1	1	12本
	腐食・脱ガス	確認・検証	15条件			○																													1	1	1	15条件
	ウェステージ	確認・検証	112条件			○																	○	○											3	1	3	112条件
水・蒸気	SCC	確認・検証	20本			○																	○												2	1	2	40本
	腐食	確認・検証	3条件			○																													1	1	1	3条件

熱処理略記　AR：As Recieved, SR：PWHT, A：Aged（SR材を加熱する）

③は衝撃試験における継手のノッチ位置条件の数を示す。

表2.1.3-6　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼１ロット当たりの試験数算出根拠

環境	試験項目	内容	本数あるいは条件数	算出根拠	備考
大気	引張	許容値策定	30本	15温度 × 2繰返し （RT～650℃／50℃＋設計温度）	母材中心
		許容値バックアップ	14本	7温度 × 2繰返し （RT，400～650℃／50℃）	母材中心，As received材および採取位置，方向の影響把握
		確認・検証	30本	15温度 × 2繰返し （RT～650℃／50℃＋設計温度）	溶着金属，継手の強度確認
	クリープ	許容値策定	10本	5温度 × 1～3応力レベル （450～650℃／50℃）（$t_r=10^5$，10^6，10^7 h目標）	母材のみ （10^4 hで中断）
	クリープおよびクリープ破断	許容値策定	22本	5温度 × 3～5応力レベル （450～650℃／50℃）（300，10^3，3×10^3，10^4，3×10^4h目標）	母材のみ
		許容値バックアップ	16本	4温度 × 3～5応力レベル （450～600℃／50℃）（300，10^3，3×10^3，10^4，3×10^4 h目標）	溶着金属の特性把握
		確認・検証	16本		F（½ or ¼）の強度確認
	クリープ破断	許容値策定	4本	1温度 × 4応力レベル 700℃ （300，10^3，3×10^3，10^4 h目標）	母材のみ
		確認・検証	16本	4温度 × 3～5応力レベル （450～600℃／50℃）（300，10^3，3×10^3，10^4，3×10^4h目標）	継手の強度確認
	疲労	許容値策定	32本	4温度 × 8ひずみレベル （450，500，550℃，設計温度） （$\triangle\varepsilon t=0.3$～$2.0\%$）	母材中心（$Nf=10^2$～10^6を満足） （ひずみ速度 $0.1\%5^{-1}$）
		許容値バックアップ	12本	2温度 × 6ひずみレベル （設計温度，500 or 550℃）＊ （$\triangle\varepsilon t=0.4$～$2.0\%$）	母材（受入材，時効材）と溶着金属の確認 ＊設計温度より高い方を選択
	疲労	確認・検証	12本	2温度 × 6ひずみレベル （設計温度，500 or 550℃）＊ （$\triangle\varepsilon t=0.4$～$2.0\%$）	継手の強度確認 ＊前述と同じ
	クリープ・疲労	許容値策定	57本	4温度 × 3～5ひずみレベル × 2ひずみ速度 （450，500，550℃，設計温度）（$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$）（$0.01$～$0.001\%s^{-1}$）	ひずみ速度の影響（低速－低速波）
				4温度 × 1～4ひずみレベル × 1～3保持時間＊ （450，500，550℃，設計温度）（$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$）（$t_H=10$～$600$ min）	台形波の評価 ＊引張／圧縮保持の弱い方
				4温度 × 2ひずみレベル × 2波形 （450，500，550℃，設計温度）（$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$）（$0.1/0.001\%\ s^{-1}$）	鋸歯状波の評価 低速－高速，高速－低速波
		許容値バックアップ	18本	1温度 × 3～5ひずみレベル × 2ひずみ速度 （設計温度） （$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$） （$0.01$～$0.001\%s^{-1}$）	ひずみ速度の影響（低速－ 低速波）
				1温度 × 2～4ひずみレベル × 2保持時間＊ （設計温度） （$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$） （$t_H=10$～$60$ min）	台形波の評価 ＊引張／圧縮保持の弱い方
				1温度 × 2ひずみレベル × 2波形 （設計温度） （$\triangle\varepsilon t=0.6$～$2.0\%$） （$0.1/0.001\%\ s^{-1}$）	鋸歯状波の評価 低速－高速，高速－低速波
		確認・検証	18本	許容値バックアップと同じ	継手の強度確認
	応力緩和	許容値バックアップ	12本	3温度 × 4（ひずみ or 応力）レベル （500，550℃，設計温度）	構成方程式から作成するSr値の検証
		確認・検証	4本	1温度 × 4（ひずみ or 応力）レベル （設計温度）	
	衝撃	確認・検証	18本	6温度 × 3繰返し × 採取方向 or ノッチ位置 （たとえば－100～25℃／25℃）	フルカーブの作成，母材の採取方向（２条件）継手のノッチ位置（Dep.，HAZ，Bond）
	高温加熱 引張	確認・検証	120本	15加熱条件＊ × 2温度 × 2繰返し （加熱温度，RT）	＊加熱温度（400～600 ℃／50℃） 加熱時間（1000，3000，10000h）
	高温加熱 じん性	確認・検証	135n本	15加熱条件＊ × 3温度 × 3繰返し × n＊＊ （たとえば，－25℃，RT，25℃）	＊＊継手ノッチの位置（Dep.，HAZ，Bond），引張はNa中の引張試験とも関連する

表 2.1.3-7　ＤＤＳ（案）における材料データ取得の考え方

試験項目	DDS（案）における考え方		
クリープ破断	ヒート数	・「ばらつき」を考慮し，実機主要構造部材である板材(代表製品形状とする)で十分なヒート数。 ・実機ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘ部材となる板，管，鍛造各ヒートを含み，十分なヒート数	４以上 10 以上
	温　度	・１ヒート内での外挿が可能な温度レベル数を各ヒートで確保。 ・「ばらつき」及び外挿性を考慮し，代表製品形状の１ヒート以上で温度レベル数５以上。 ・温度レベルは実機設計温度とこれより５０℃以上上限温度を含む。	３温度以上 １ﾋｰﾄ以上 500, 550, 600℃
	時　間	・長時間側への外挿精度を高めるため，各温度ともある程度以上長時間のデータを含む。 ・代表製品形状，代表ヒートに対し，設計時間の 1/10 以上の時間データを含む。 ・将来的には基準案の妥当性確認として，可能な限り長時間データを採取。	> 6000h 2～30000h 10^5h
	データ点	・長時間データを含み，定式化の信頼性確保できる点数。	１ﾋｰﾄ10 点以上 全体 100 点以上
クリープひずみ	－	・基本的にはクリープ破断と同じ。 ・代表製品形状，代表ヒートに対し，設計寿命の 1/2 位の破断応力下での変形データを含む。	10^5h 破断応力下
高温疲労	ヒート数	・「ばらつき」を考慮し，代表製品形状で十分なヒート数。 ・実機ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘ部材となる板，管，鍛造各ヒートを含み，十分なヒート数 (標準的試験片によるデータ取得可能な製品形状)	４以上 10 以上
	温　度	・１ヒート内での外挿が可能な温度レベル数を各ヒートで確保。 ・「ばらつき」及び外挿性を考慮し，代表製品形状，代表ヒートについては温度レベル数５以上。	４以上 １ﾋｰﾄ以上
	データ点	・標準ひずみ速度(10^{-3}mm/mm/s)データに対して，十分な信頼性，外挿性を確保できる点数。 ・信頼性，外挿性確保のために，代表ヒートに対し，数種類のひずみ速度データの蓄積。 ・低ひずみ範囲側への外挿性向上のため，10^5 サイクル以上 10^6 サイクルまでのデータの確保。 ・Ｂ，Ｃ線図の信頼性確保のため，10^{-6}mm/mm/s 以下のひずみ速度データの拡充。	１ﾋｰﾄ５点以上 ４種類以上 ５点以上 ３点以上

表 2.1.3-8　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼に関する取得データ量（平成１０年度終了時点）

材料特性	母材		溶接部	
	取得データ	基準化検討に用いたデータ	溶接金属取得データ	溶接継手取得データ
クリープ破断	１１８	９３	４０	８４
第３期クリープ開始時間	７８	５９	３８	２０
定常クリープ速度	７９	６０	３８	２０
クリープひずみ	６７	５８	３６	１２
応力緩和	２	２	０	０
低サイクル疲労	８８	７４	０	２８
クリープ疲労	２１	－	０	６
引張強度	２４８	１６６	７２	２５６
弾塑性応力－ひずみ	７４	２０	２４	１６

表 2.1.3-9　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼の物性値・高サイクル疲労データの取得系計画

項　目		板　材		鍛造材		伝熱管	
供試材		t25×1000×1000		t550		φ 31.8×t3.5	
縦弾性係数	共振法	RT～600℃	3	RT～600℃	3	RT～600℃	3
熱膨張係数	押棒式変位検出法	RT～600℃	3	RT～600℃	3	RT～600℃	3
疲労試験	ひずみ制御(応力制御)	[RT]: 10^2, 2×10^2, 5×10^2, 10^3, 2×10^3, 5×10^3, 10^4, 2×10^4, 5×10^4, 10^5, 2×10^5, 5×10^5, 10^6, 2×10^6, 5×10^6, 10^7, 2×10^7, 5×10^7, 10^8, 2×10^8 / [300℃]: 10^2, 3×10^2, 10^3, 3×10^3, 10^4, 3×10^4, 10^5, 3×10^5, 10^6, 3×10^6, 10^7, 3×10^7, 10^8	28	同左	28	—	0

注）□部については、応力制御で実施。これ以外については可能な限りひずみ制御とし、不可の場合応力制御にて実施するものとする。ひずみ制御と応力制御のデータに不連続が生じた場合は応力制御のデータは参考値とする。

表 2.1.3-10　ＤＯＥ実施試験と国内対応の考え方

タスク	項　目	ＤＯＥ計画 試験データ	ＤＯＥ計画 目的・使途	ＦＮＣ，ＦＭＥ小委員会検討項目 材料強度基準への活用上の課題	ＦＮＣ，ＦＭＥ小委員会検討項目 対処方針	
タスク1 クリープ疲労評価法	クリープ疲労損傷評価法（サブタスク2）	・長時間クリープ破断試験	長時間データ補充	・国内材との整合性の確認	・板，管はFSG データと比較 ・鍛造はデータ不足	→ 比較対照試験
		・ステップ負荷クリープ破断試験 ・ひずみ制御クリープ疲労試験（保持）	クリープ疲労損傷評価法の検討 評価線図の作成	・同上 ・データ補充	・データがほとんど無いため試験によりデータ充足	→ 比較対照試験
	溶接継手のクリープ疲労強度低減係数（サブタスク3）	・溶接継手管状試験片 軸方向クリープ破断試験 ねじりクリープ破断試験 軸方向疲労試験 ねじり疲労試験	溶接継手設計係数の確認	・国内材との整合性の確認 ・クリープデータ補充 ・クリープ疲労への適用性検討	・鍛造のクリープデータ補充 ・疲労，クリープ疲労データ充足	→ 比較対照試験
	熱過渡試験によるクリープ疲労損傷評価（サブタスク4）	・母材円筒試験 ・周方向継手円筒試験	熱応力評価法の検証	（内容，結果によっては将来データ充足，評価法の検討を要す）	————	
	クリープ疲労に及ぼす時効の影響（サブタスク5）	・50,000～75,000時間時効後組織，引張，クリープ，シャルピー，クリープ疲労	長時間使用中の材質劣化の検討	・国内材との整合性の確認	・FSG データと比較し，問題があれば提起	
タスク2 非弾性解析	単軸変形挙動試験（サブタスク2）	・応力変動クリープ試験 ・応力緩和を含む繰返し試験 ・応力保持を含む繰返し試験	非弾性解析用構成式の作成，検証（特に統一型）	・応力ひずみ式，クリープひずみ式については国内材との整合性確認要。 ・塑性・クリープ分離型構成式の適用性も含めて国内での技術基盤との適合性の検討。	・国内材によるデータ充足 ・分離型モデルとの比較検討	→ 比較対照試験
	多軸変形挙動（サブタスク3）	・管状試験片 軸－ねじり疲労試験				
タスク3 破壊力学	Ｊ－Ｒ曲線の作成	・母材　：ＳＲ 母材　：ＳＲ＋時効 溶接金属：ＳＲ 溶接金属：ＳＲ＋時効 （時効：10,000時間）	健全性評価用データ	・国産材との整合性の確認 ・データの有効性の確認 ・データ充足	・国内データを収集してDOE データと比較	

表 2.1.3-11　比較対照試験内容とＤＯＥ実施内容の対比

項　　目	ＤＯＥ	ＦＮＣ，ＦＭＥ
クリープ疲労損傷評価法	・長時間クリープ破断試験……10	・板，鍛造データ採取，管はＦＳＧデータ活用 （ＦＳＧ：8000h，ＦＳＧデータの外挿精度を長時間ＤＯＥデータにより補正）
	・ステップ負荷クリープ破断試験… 6	・応力増減クリープ試験 （変形測定）…… 4
	・ひずみ制御クリープ疲労試験 （保持）…… 6	・ひずみ制御クリープ疲労試験 （保持，速度）……板23 ・板曲げ疲労試験…… 3
溶接継手のクリープ疲労強度低減係数	・溶接継手管状試験片 軸方向クリープ破断試験…… 2 ねじりクリープ破断試験…… 2 軸方向疲労試験……10 ねじり疲労試験……10	◎管溶接継手試験片 ・内圧クリープ破断試験……27 ・軸方向クリープ疲労試験……16 ◎板状溶接継手試験片 （溶接材料クリープ疲労）…… 7 ・軸方向クリープ疲労試験……19 ・板曲げ疲労試験…… 7
単軸変形挙動試験	・応力変動クリープ試験 ・応力緩和を含む繰返し試験 ・応力保持を含む繰返し試験　} 6	・応力変動クリープ試験…… 4 ・応力緩和試験　　…… 4 ・長時間クリープ試験　…… 2 ・引張試験　　…… 4　} 14 ・引張ひずみ保持試験　…… 3 ・中間ひずみ保持試験　…… 1 ・変動ひずみ範囲試験　…… 1 ・低速繰返し試験　　…… 4　} 9
多軸変形挙動	・管状試験片 軸－ねじり疲労試験…… 6	◎丸棒試験片 ・軸－ねじり疲労試験 ・軸－ねじり メカニカルラチェック ・内圧－軸 メカニカルラチェック　} 6

表 2.1.3-12　母材のクリープ疲労試験

試験項目	材料	温度（℃）	$\dot{\varepsilon}$（%/s）	t_H（分）	$\Delta\varepsilon$（%）	本数	試験期間（月）
$\dot{\varepsilon}$効果	板	550	0.001	0	1.0	1	1
保持効果*	板	550	0.1	1	1.0	2	0.5
				10	1.0 0.5	4	4
				60	1.0	4	8
		600	0.1	1	1.0	1	0.5
				10	1.0	1	0.5
	鍛造	550	0.1	1	1.0	1	0.5
				10	1.0	1	0.5
				60	1.0	1	2

注）* 保持条件
1本のもの：引張ピーク保持
2本のもの：引張ピーク保持，圧縮ピーク保持
4本のもの：引張ピーク保持，圧縮ピーク保持，中間保持2本

表 2.1.3-13　繰返し変形挙動試験

温度	試験項目	試験条件			試験期間（月）
550℃	低速繰返し	$\Delta\varepsilon$ = 0.5 %	$\dot{\varepsilon}$（%/s）	N	2.0
			10^{-3}	500	
			10^{-4}	100	
			10^{-5}	11	
			2×10^{-6}	3	

表 2.1.3-14　応力緩和試験

区分	試験温度	保持ひずみ	試験時間
母材	550℃	εt = 0.2 %，0.5 %	300hr
溶接金属	550℃	εt = 0.2 %，0.5 %	300hr

表 2.1.3-15　応力漸増・漸減クリープ試験

	負荷条件				
応力漸増 550℃	応力	20 → 21 → 22 → 23kgf／mm²			
	1	2500h	875h	500h	→t_R
	2	1000h	700h	600h	→t_R
応力漸減 550℃	応力	23 → 22 → 21 → 20kgf／mm²			
	1	200h	500h	875h	→t_R
	2	320h	600h	700h	→t_R

表 2.1.3-16　繰返し軟化後のクリープ特性試験

軟化条件	繰返し軟化前の想定破断時間	繰返し軟化後の想定破断時間	負荷応力
$\Delta\varepsilon_t$=1.0%	10^4h	10^3h	191 Mpa
N=900	3×10^4h	3×10^3h	172 Mpa
$\Delta\varepsilon_t$=0.5%	10^5h	10^4h	157 Mpa
N=5000	2×10^5h	2×10^4h	147 Mpa

表 2.1.3-17　内圧クリープ破断試験　（応力：kgf／mm²）

鋼種		Mod.9Cr-1Mo鋼			9Cr-2Mo鋼	
試験温度		550℃			550℃	
想定破断時間		500h	1000h	2000h	500h	1000h
管母材		28.0	23.5	21.4	19.0	17.3
管／管 継手	初層ﾌｨﾗｰ有	26.0	23.5	21.4	—	—
	初層ﾌｨﾗｰ無	30.5	27.8	24.2	—	—
管／鍛造材 継手	外面TIG	26.7	24.1	21.4	—	—
	内面TIG	31.4	27.0	21.6	—	—

表 2.1.3-18　多軸変形挙動試験

試験項目		試験本数	備考
繰返し軸力－繰返しねじり		2	試験温度はすべて 550 ℃
メカニカルラチェット	軸力－ねじり	2	
	内圧－軸力	2	

表 2.1.3-19　溶接継手のクリープ疲労試験

材料		試験片	温度 (℃)	t_H (分)	△ε (%)	本数	試験期間 (月)	備考
Mod.9Cr-1Mo 鋼板	溶金	丸棒	550	0	1.0 ～0.5	4	0.5	
				10	1.0 0.5	2	2	
				60	1.0	1	2	
	継手	丸棒	550	0	1 ～0.5	4	0.5	
				10	1 0.5	2	2	
				60	1.0	1	2	
					0.5	2	8	
		板	550	10	1.0 0.5	2	2	板曲げ
				60	1.0	1	2	
Mod.9Cr-1Mo 鋼鍛造	継手	丸棒	550	0	1.0 0.5	2	0.3	
				60	1.0	1	2	
9Cr-2Mo鋼	板継手	板	550	0	1.0 ～0.5	3	0.5	板曲げ
				60	1.0	1	2	
	管継手	中空円筒		0	1.0 ～0.5	3	0.5	

表 2.1.3-21a　改良９Ｃｒ鋼/ＳＵＳ３０４鋼異材継手の特性把握試験(その 1)

試験項目	試験片採取位置	試験条件		対象ヒート
		温度 (℃)	ひずみ範囲 (%)	
板曲げ低サイクル疲労試験	継手全体	550	0.5	MB1, TB1, HB1
低サイクル疲労試験（部分要素試験）	ＳＵＳ３０４鋼母材部	550	0.4～0.6	MB1
	ＳＵＳ３０４鋼熱影響部	550	0.3～0.7	
	インコネル８２溶接金属部	550	0.3～0.7	
	改良９Ｃｒ鋼母材部	550	0.3～0.5	
低サイクル疲労試験（部分継手試験）	改良９Ｃｒ/インコネル	550	0.4～0.8	
	インコネル/ＳＵＳ３０４	550	0.4～0.8	
低サイクルクリープ疲労試験（部分継手試験）	改良９Ｃｒ/インコネル	550	0.6% 1ｈ保持	
	インコネル/ＳＵＳ３０４	550	0.6% 0.5ｈ保持	
硬さ試験	継手全体	－		MB1, TB1, HB1
組織観察	ａｓ ｗｅｌｄ	－		
	低サイクル疲労試験片	－		
	クリープ試験片	－		
成分分析	ａｓ ｗｅｌｄ	－		
	低サイクル疲労試験片	－		
	クリープ試験片	－		

表 2.1.3-21b　改良９Ｃｒ鋼/ＳＵＳ３０４鋼異材継手の特性把握試験(その 2)

（クリープ破断試験）

試験片採取位置	温度 (℃)	応力 (MPa)	対象ヒート
改良 9Cr/ｲﾝｺﾈﾙ/SUS304	500	279, 265	MB1
	550	235～186	
	600	167, 147	
	650	127, 88	
	550	235, 206	HB1
改良 9Cr/ｲﾝｺﾈﾙ	500	279	TB1
	550	235, 206	
	600	157, 147	
	650	108, 88	
SUS304/ｲﾝｺﾈﾙ	500	279	
	550	265, 216	
改良 9Cr/SUS309ﾊﾞﾀﾘﾝｸﾞ/SUS308 溶金/SUS304	550	235, 216	MB2
	600	147, 137	
改良 9Cr/ｲﾝｺﾈﾙ	600	145	MB1
	550	195～225	MB4
SUS304 熱影響部	550	275～216	MB1
ｲﾝｺﾈﾙ溶金	550	363～422	MB4

表 2.1.3-20　熱影響部模擬材作製熱サイクル条件

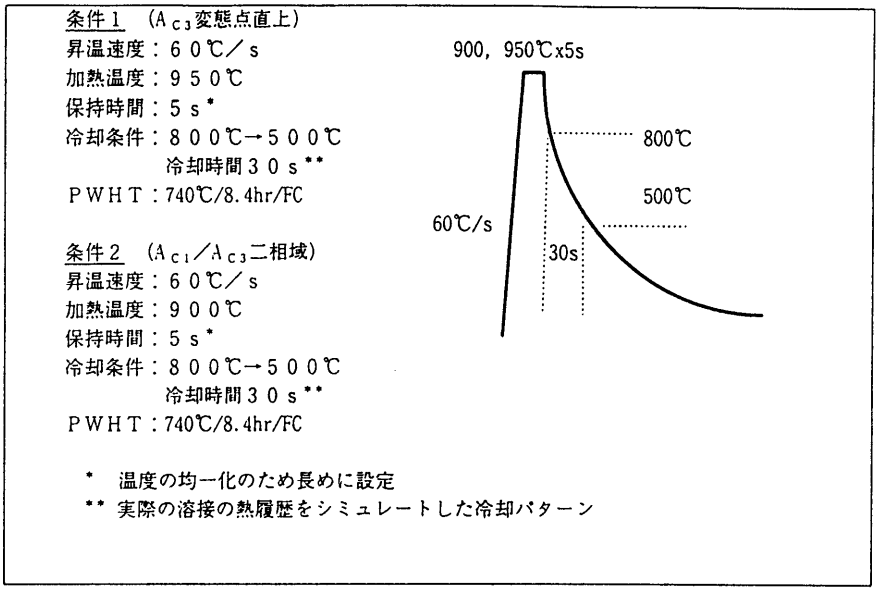


表 2.1.3-22　改良９Ｃｒ－１Ｍｏ鋼ＳＣＣ性感受性試験条件

材料区分	母材				溶接ＨＡＺ	溶接金属
試験の位置付け	標準試験		過酷試験（1）	過酷試験（2）	標準試験	標準試験
試験方法	SSRT 試験	WUﾍﾞﾝﾄﾞ試験	ＣＢＢ試験	ＣＢＢ試験	ＣＢＢ試験	ＣＢＢ試験
試験条件						
・試験温度（℃）	288	288, 500	288	250	288	288
・試験圧力（MPa）	8.34	8.34, 14.70	8.34	8.34	8.34	8.34
・溶存酸素（ppm）	8	8	32	32	8	8
・塩素（ppm）	0	0	0	1000	0	0
・導電率（μ S/cm）	1以下	1以下	0.2	0.2以下	1以下	1以下
・ひずみ速度（1/s）	4.16×10^{-7}	—	—	—	—	—
・浸漬時間（hr）	—	500, 1000	500, 1000	300	500, 1000	500, 1000
比較対照試験材料	2.25Cr-1Mo 鋭敏化 SUS304	2.25Cr-1Mo 鋭敏化 SUS304	2.25Cr-1Mo 鋭敏化 SUS304	2.25Cr-1Mo 鋭敏化 SUS304	2.25Cr-1Mo	無し

2.2　３１６ＦＲ鋼

2.2.1　対象材料選定経緯

先に述べたように，高速増殖炉に適用する構造材料のうち，とくに高温での使用が想定される１次系機器においては，高温強度に優れた材料の採用が必要である。

国内における高速増殖炉の開発においては，実験炉“常陽”，原型炉“もんじゅ”に続き，実証炉の設計研究を行っており，経済性をも加味した種々の検討を実施している。経済性の観点からは，①熱効率の向上を目指す運転温度の上昇と，②構造部材・系統設備の簡素化等を検討している。これらを実現する構造材料としてクリープ特性及びクリープ疲労特性に優れるとともに，長時間に及ぶ組織安定性にも優れた材料が必要となる。

このため，従来型構造材料の成分検討に基づき３１６系ステンレス鋼をベースとした３１６ＦＲ鋼が開発された[2-1, 2.2-1～5]。３１６ＦＲ鋼は，①クリープ破断延性を損なう炭化物の粒界析出を抑制するための極低炭素化と，②低炭素化にともなって生じる強度の低下を補うため長時間使用条件下でも組織を安定に保つための窒素添加を，成分設計の基本としている。

図 2.2.1-1 にＳＵＳ３０４鋼，ＳＵＳ３１６鋼，及び３１６ＦＲ鋼のクリープ破断強度の比較を示す[2.2-6]。３１６ＦＲ鋼はＳＵＳ３１６鋼やＳＵＳ３０４鋼と比べて優れた高温強度を有している。図より３１６ＦＲ鋼はＳＵＳ３０４鋼に比べほぼ 50℃相当のクリープ強度向上が図られていることがわかる。図 2.2.1-2 はこの材料の使用を前提とした実証炉のヒートバランス図である[2-1]。

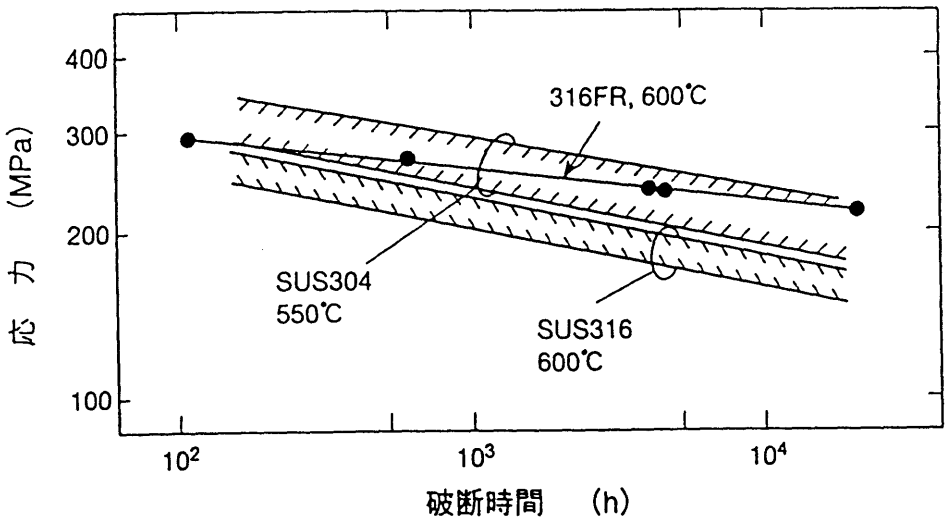


図2.2.1-1　３１６ＦＲ鋼とＳＵＳ３１６鋼及びＳＵＳ３０４鋼のクリープ破断強度の比較[2.2-6]

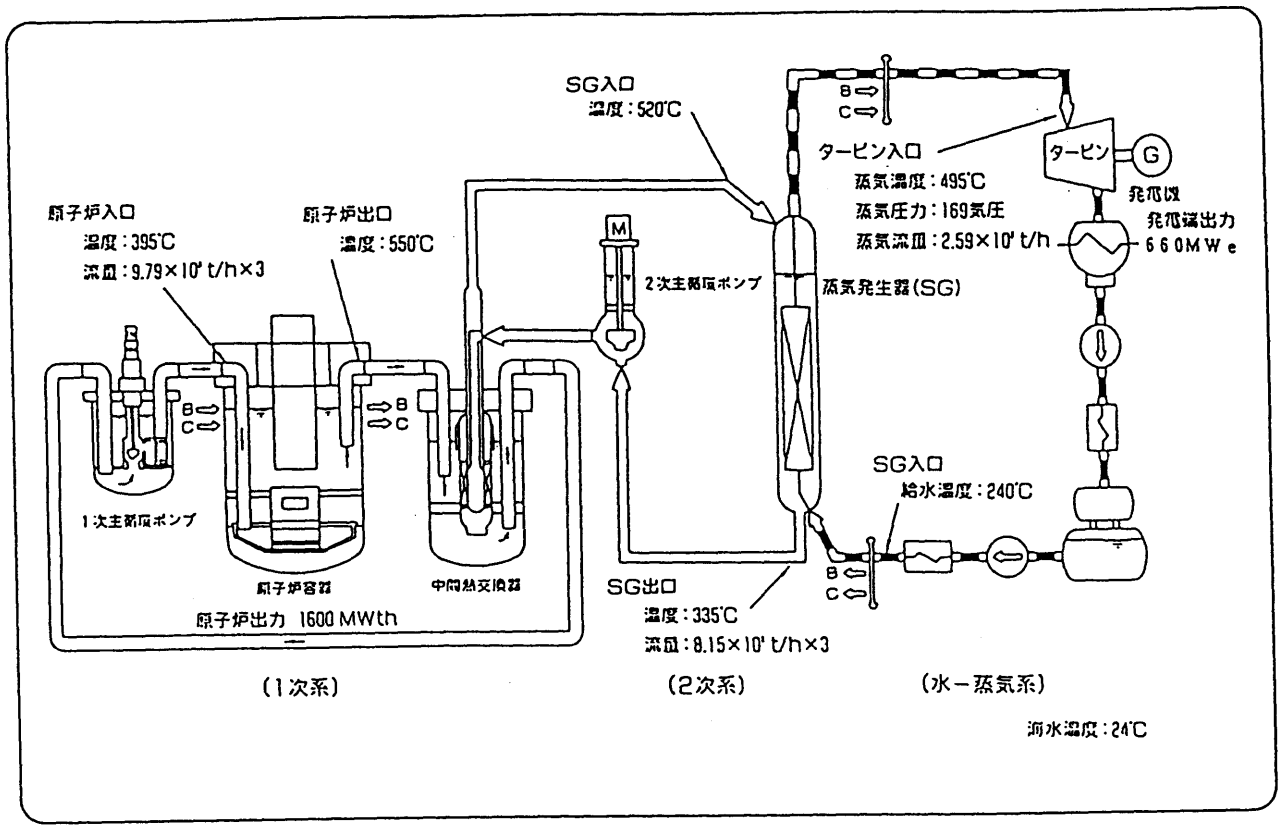


図2.2.1-2　FBR実証炉のヒートバランス図[2-1]

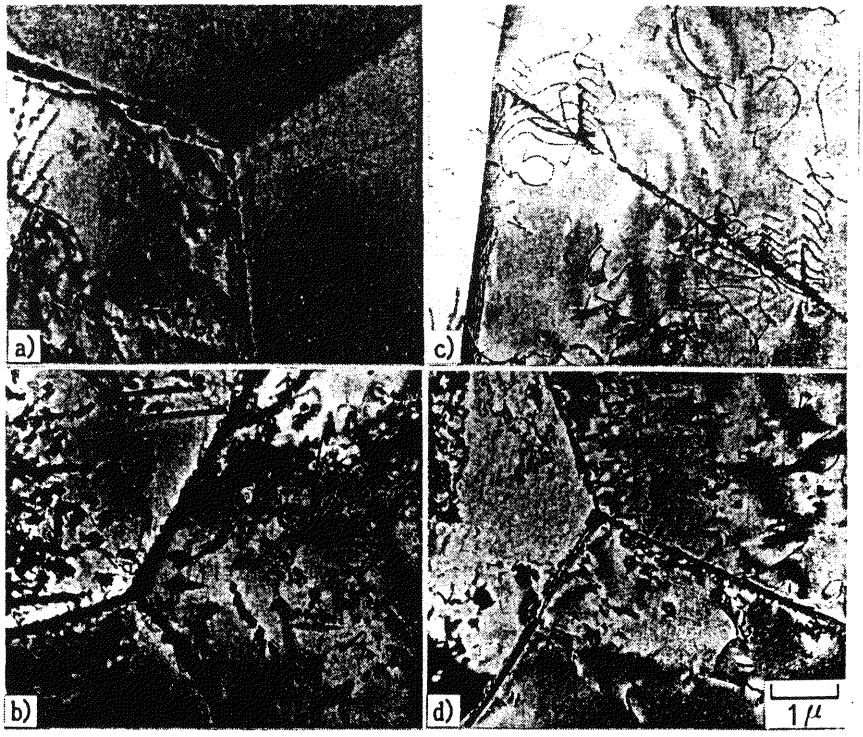
2.2.2　対象材料の特徴

耐熱鋼においては高温使用中に進行する析出等の組織変化のため，鋼種による差はあるが，長時間側での強度低下あるいは延性低下等の機械的性質の劣化が生じる。このような組織変化に伴う材質の劣化をできるだけ小さくするため，３１６ＦＲ鋼においては強化元素として固溶度の小さな炭素の代わりに固溶度の大きな窒素を利用している。図2.2.2-1は従来型の３１６鋼(0.05%C-0.02%N)と３１６ＦＲ鋼(0.01%C-0.07%N)の高温時効材の電子顕微鏡組織を示したもので[2.2-3]，前者には多量の粗大な炭化物及び金属間化合物Ｇ相の析出が認められる。しかし，後者には非常に微細な金属間化合物 Laves 相が析出するが，その析出速度は炭化物に比べ著しく遅く，組織変化は前者の場合より著しく小さい。

３１６ＦＲ鋼と従来型のＳＵＳ３１６鋼のクリープ破断特性を図 2.2.2-2 に示す[2.2-1]。両鋼のクリープ破断強度は短時間側では同じであるが，長時間側では３１６ＦＲ鋼の方が高い。クリープ破断延性についてはＳＵＳ３１６鋼は延性の低下する時間領域を有するのに対し，３１６ＦＲ鋼の破断延性は時間に対して安定している。このような両鋼の特性の差は炭素量と窒素量の相違により説明されている[2.2-1,7]。すなわち，３１６ＦＲ鋼のクリープ中の主要析出物は粒界への Laves 相であるが，長時間側まで微細であること等から粒界脆化を生じない。これに対し，ＳＵＳ３１６鋼においては粒界に析出する炭化物により粒界脆化が生じる。破断強度については，ＳＵＳ３１６鋼の主要強化元素である炭素は短時間側では固溶強化及びクリープ中に析出する炭化物による分散強化が期待できるが，長時間側では固溶強化が期待できないことに加え炭化物の凝集・粗大化が進行するため強度が低下する。一方，３１６ＦＲ鋼では固溶度の大きな窒素のため長時間側まで強化作用に変化が生じない。このように３１６ＦＲ鋼は，従来型の３１６鋼に比べ，高温使用中の特性劣化につながる組織変化を抑制した材料となっている。

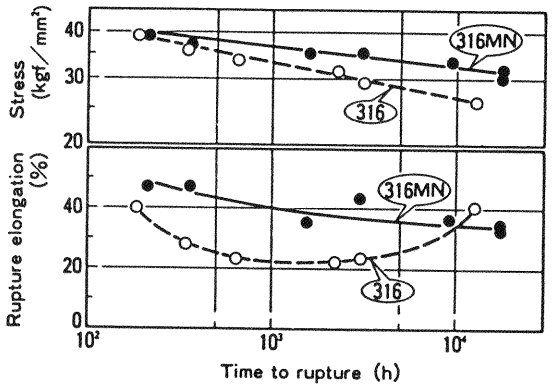
なお，フランスの高速実証炉「スーパーフェニックス」の１次系構造用として低炭素窒素添加型の３１６Ｌ(Ｎ)ＳＰＨ鋼が既に使用されている。３１６Ｌ(Ｎ)ＳＰＨ鋼の一部のクリープ破断に関する公表データ[2.2-8]においては，３１６Ｌ(Ｎ)ＳＰＨ鋼は３１６ＦＲ鋼よりクリープ破断強度，とくに長時間側の強度が低いこと，及び破断延性が低いことが示されている。また，３１６Ｌ(Ｎ)ＳＰＨ鋼のクリープ破断材の組織変化が３１６ＦＲ鋼と比較検討され，両鋼のクリープ破断特性が相違する原因について次の

ように考察されている[2.2-9]。すなわち，３１６Ｌ(Ｎ)ＳＰＨ鋼は炭素量が 0.02%と３１６ＦＲ鋼の 0.01%に比べ高めであるため高温使用中の炭化物の粒界析出量が３１６ＦＲ鋼より多いため破断延性が低くなり，また，粒内にも炭化物が析出しLaves相の粒内析出が加速されるため破断強度が低下すると推定される。３１６系ステンレス鋼の高速増殖炉温度域における炭素の固溶限は数 ppm であるため３１６ＦＲ鋼と３１６L(N)ＳＰＨ鋼の炭素量のわずかな相違が組織安定性に変化を与え，クリープ破断特性に大きく影響したものと考えられる。



a) 316 : 600°C　b) 316 : 650°C
c) 316 FR : 600°C　d) 316 FR : 650°C

図 2.2.2-1　316FR 鋼と SUS316 鋼の 1000 h 時効組織の比較（薄膜顕微鏡組織）[2.2-3]



３１６ＭＮ＝３１６ＦＲ

図 2.2.2-2　316FR 鋼と SUS316 鋼の 550℃クリープ破断強度及び延性の比較[2.2-3]

2.2.3 試験計画の設定

(1) 概要

高速増殖炉は冷却材として高温の液体ナトリウムを使用するため，熱過渡時の熱応力及び高温に対する構造強度設計が重要となる。すなわち，機器の起動停止に伴う繰返し熱応力と運転中の高温保持によるクリープが重畳したクリープ疲労損傷が支配因子となるため，クリープ疲労特性の把握及び評価法の確立が極めて重要となる。また，実証炉では原子炉容器の大型化により原型炉のような一体鍛造リング材の適用ができないため，高応力が発生する炉容器ナトリウム液面近傍にも溶接部が不可避的に存在する。溶接部は一般に冶金的不連続のためひずみ集中や強度低下が生じ易く破損部位となることが多い。このため，溶接部の高温強度評価法の確立は高速増殖実証炉の信頼性確保において重要となる。

一方，ＦＭＥ小委員会で３１６ＦＲ鋼の高速増殖炉への適用化研究を開始した1990年当時(平成２年)，ＳＵＳ３１６鋼の改良材として開発された３１６ＦＲ鋼について国内各機関でデータが取得され，従来材に比べ優れたクリープ強度･延性及びクリープ疲労特性を示すことが公表されつつあり[2.2-10～13]，海外ではフランスの高速増殖炉スーパーフェニックスに類似材の３１６Ｌ（Ｎ）ＳＰＨ鋼が適用されていた[2.2-14]。

以上のような状況のもと，ＦＭＥ小委員会において３１６ＦＲ鋼の高速増殖炉への適用性検討を目的とする研究が開始された。本研究では，①材料強度基準用データ取得計画及びデータ蓄積･高温強度特性（溶接部を含む）の把握，②クリープ疲労評価法の検討，及び③溶接部強度評価法の検討 を行うことにし，以下の３段階で研究を推進した。

・第１次研究：平成２年度～平成４年度
  ・材料強度基準策定用データ取得計画立案と高温強度特性データ取得
    (長時間クリープ試験開始)
・第２次研究：平成５年度～平成７年度
  ・クリープ疲労評価法及び溶接部強度評価法の検討用試験計画の策定
  ・試験の実施・評価法の検討
  ・長時間クリープ試験継続
  ・異材継手の研究着手

・第３次研究：平成８年度～平成１０年度

・材料強度基準の策定と根拠データの整備

・クリープ疲労評価法及び溶接部強度評価法の妥当性検討

・長時間クリープ試験継続及び長時間クリープ疲労試験開始

・DOE との長時間材料試験の実施

(2) 試験計画の立案

以下に各課題に対する試験項目の考え方，試験条件設定の考え方について示す。

a. 材料強度基準の策定

３１６ＦＲ鋼の高速増殖炉への適用性検討と適用化のための重要課題である高温強度特性の把握と実証炉用材料強度基準の策定に必要な試験項目とヒート数･データ量を設定した。計画では当時，データが少なく特性把握が不十分であった溶接部の高温強度特性も把握できるようにした。

試験条件設定にあたっては，表 2.2.3-1 に示すように，各試験項目を試験区分（許容値策定用，許容値バックアップ用，材料特性確認検証用）に分類した。なお，ＦＭＥ小委員会の試験範囲は大気中試験とし，環境効果については対象外とした。更に表 2.2.3-2 に示すように許容値策定に必要な材料ロット数･試験データ数を算定し，他研究機関の取得済みデータを勘案した上で取得計画を策定した。なお，１ロット当りの試験数算出根拠は表 2.2.3-3 の通りである。また，許容値策定の中心的試験項目であるクリープ，疲労については，表 2.2.3-4 にような考え方で試験条件を設定した。極力長時間試験を計画し，一部の試験は平成 10 年現在も継続実施しているが，クリープ試験では最長１０万時間の条件を設定し，低応力長時間のクリープ変形データが得られるようにした。これら計画は，その後のデータ取得による材料挙動結果を考慮して見直しを行ってきた。その見直し計画により，現状で取得した試験の総データ量を表 2.2.3-5 に示す。

b. クリープ疲労評価法の検討

前述のように，高速増殖炉は冷却材として高温の液体ナトリウムを使用するため，機器の起動停止に伴う繰返し熱応力と運転中の高温保持によるクリープが重畳したクリープ疲労損傷が支配因子となる。そこで，実機設計法への反映･バックアップを目的として，クリープ疲労評価法に関する検討を行った。

クリープ疲労評価法の検討に関する試験条件を表 2.2.3-6～15 に示す。実機で重要な長時間･低ひずみ範囲のクリープ疲労試験として表 2.2.3-6 に示すように 1%-100 時間保持，0.6%-10 時間保持，0.4%-10 分保持を計画した。波形効果が検討できるよう，引張ひずみ台形波以外にも SF 波(引張側 Slow-圧縮側 Fast)や実機で想定される中間保持試験を計画した（表 2.2.3-7)。更に実機負荷波形に近い引張保持付 SF 波のクリープ疲労試験も計画し，評価法の実機適用性が検討できるようにした（表 2.2.3-8)。また，代表条件では環境効果が検討できるように真空中での試験も計画した（表 2.2.3-9)。

クリープ疲労評価法として従来の時間消耗則だけでなく延性消耗則の適用性が評価できるよう低ひずみ引張試験を計画する（表 2.2.3-10）とともにクリープ疲労中止め試験片を低ひずみ引張試験により破断させ，残存延性が把握できるよう計画した（表 2.2.3-11)。その他，ステップ状変動応力下のクリープ試験によるロビンソン則成立性確認試験（表 2.2.3-12)，SEM 付サーボ試験機を用いたクリープ疲労試験中の損傷観察試験（表 2.2.3-13)，応力緩和挙動に及ぼす保持直前のひずみ速度依存試験（表 2.2.3-14)，繰返し硬化後のクリープ試験（表 2.2.3-15）を計画した。

クリープ疲労ではないが，許容応力策定において鍛造材疲労強度が低ひずみ範囲側で低下することが判明し，この原因と考えられる結晶粒度[2.2-16]に関し，粗粒材の低ひずみ範囲側疲労試験（表 2.2.3-16）を計画した。また，高温長時間使用後の強度特性把握を目的とした時効材の低ひずみ速度引張試験（SSRT)，クリープ破断試験及び低サイクル疲労試験を計画した（表 2.2.3-17)。

c. 溶接部強度評価法の検討

実証炉では原子炉容器の大型化により高応力が発生する炉容器ナトリウム液面近傍にも溶接部が存在するため溶接部の高温強度評価法の確立が重要となるため，溶接部の高温強度評価法に関する検討を行った。

溶接部強度評価法の検討に関する試験条件を表 2.2.3-18～表 2.2.3-23 に示す。第 1 次研究の結果では，継手試験片の低サイクル疲労試験は標点間距離（以下，GL と略す）外破断が多く，公表文献[2.2-15]により繰返し硬軟化後でも溶接部に比べ母材が軟らかいため溶接部から離れた母材一般部にひずみ集中し破断するため結

果として継手試験片の GL 長さにより疲労寿命が異なることが明らかになりつつあった。そこで第２次研究では，大型試験片により高温繰返し中の各部のひずみを測定する溶接部～母材部のひずみ分布把握試験（表 2.2.3-18），GL 中の母材部･母材硬化部･溶接金属の割合が異なる試験片により GL 中の溶接金属部の割合が低サイクル疲労寿命へ及ぼす影響把握試験（表 2.2.3-19）を計画した。また，ビード方向と負荷方向の角度を変化させた試験片により継手強度が最弱となるビード方向が把握できる試験を計画（表 2.2.3-20）し，結果的に強度が最弱であった横継手については，実機で重要となる低ひずみ範囲側（～0.35%）の継手強度試験を計画した。

継手試験片を母材部･母材硬化部･溶接金属部の力学的結合体として強度評価する３要素モデルにおいて必要となる各部の疲労特性及びクリープ特性の取得試験を計画した。溶接金属部と母材硬化部は異方性が予想されたので，溶接線と負荷方向が一致するＬ方向試験，直交するＴ方向試験を計画した（表 2.2.3-21，22)。更に，実機で重要となる継手クリープ疲労を検討するために継手及び各構成材の試験を計画し，継手のクリープ疲労強度の３要素モデルによる評価可能性が検討できるようにした（表 2.2.3-23)。

［参考文献］

[2.2-1] NAKAZAWA, T., et al; "Effects of Carbon, Nitrogen and Molybdenum on Creep Properties of Type 316 Stainless Steels", Proceedings of 6th International Conference on Pressure Vessel Technology, Beijing, (1988), Vol.2, Materials & Fabrication, p.1041

[2.2-2] SAWARAGI, Y., et al; "Elevated Temperature Strength and Microstructure of Low carbon 316 and 347 Stainless Steels Containing Nitrogen", Sumitomo Metals, Vol.40, No.4(1988), p.41 (in Japanese)

[2.2-3] 中澤崇徳，他：”長時間クリープ破断強度を窒素添加により改善した高速増殖炉用 SUS316 の開発”， 鉄と鋼，Vol.75(1989)，p.1346

[2.2-4] WADA, Y., et al; " Development of New Materials for LMFBR Components; Evaluation on Mechanical Properties of 316FR Steel", International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Vol.1, (1991), p.7.2-1

[2.2-5] NISHIDA, T., et al; "Development of 316 Stainless Steel with High Creep Rupture Strength for FBR Structure Materials", International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Vol.4, (1991), p.4.7-1

[2.2-6] UETA, M., et al; "Status of the Development of Advanced Structural materials for Japanese DFBR", The 13th SMiRT, Porto Alegre, Aug., (1995), Vol.1, Div.E, p.263

[2.2-7] 中澤崇徳, 他：" CとN量の異なる316系ステンレス鋼のクリープ破断特性と組織の関係", 鉄と鋼, Vol.84(1998), p.573

[2.2-8] SCHIRRA, M., et al; "Zeitstandfestigkeits und Kriechversuche am EFR-Strukturwerkstoff 316L(N), DIN 1.4909", Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1990), No.4767

[2.2-9] 中澤崇徳, 他; " 欧州型および国産型の低炭素・中窒素系316鋼のクリープ破断特性と微細組織", 火力原子力発電, Vol.49, (1998), p.342

[2.2-10] 加納, 他：原子力工業, vol.34, No.10(1988), 19

[2.2-11] 三菱重工業, 新日本製鉄：日刊工業新聞他 (1987年1月)

[2.2-12] 古藤, 他：日本材料学会第27回高温強度シンポジウム前刷集 (1989), p.51

[2.2-13] 電力中央研究所：平成元年度FBR実証炉研究成果発表会—図表集— (1989)

[2.2-14] M.Mottot et al. : ASTM STP 770 (1982) 152

[2.2-15] Koto,H., et al. : "Evaluation of Weldment Strength-Reduction Factors for Fast Reactor Components Considering Gage Length Effect", Trans. of 12th SMiRT, Vol.E, pp.179-184.

[2.2-16] 高橋, 他：「高速炉構造用SUS316鋼の高温強度に及ぼす結晶粒度の影響」, 材料, 第46巻, 第11号, (1997), p.1274

表 2.2.3-1　試験計画案作成のための試験区分と内容

試験の位置付け / 区分	項目	目的	許容値策定 許容値策定のための大気中母材の強度データ	許容値バックアップ 許容値策定をサポートするための強度データ	確認・検証 溶接継手部の強度特性確認のデータ	備考
大気中 許容値策定のためのデータ	引張	許容応力強さの策定	母材の強度変形データ	母材：板厚、方向の影響データ及び管相当板、鍛造材、伝熱管の強度変形データ 溶接金属：強度変形データ	溶接継手：強度データ	1) 必要ロット数 ①引張、クリープ、クリープ破断、疲労、クリープ疲労については、許容値策定及び許容値バックアップを合わせて9ロット以上とし、繰返しを含めた総ロット数は、13以上とする。 ②上記以外は、特にロット数を限定せず。 2) 鍛造は、肉厚の1/2 1/4のうち弱い方の1/4の部分を主対象とする。
	クリープ クリープ破断	許容応力強さの策定 クリープ構成式の策定				
	疲労	許容ひずみ線図の策定				
	クリープ疲労	許容ひずみ線図の策定 クリープ疲労・損傷制限値の決定				
大気中 許容値バックアップのための試験	応力緩和	クリープ構成式より算出される応力緩和強さのバックアップ		母材：板材の応力緩和曲線	溶接金属：応力緩和曲線	
大気中 材料の特性把握のための試験（確認・検証）	衝撃	材料の靭性を把握				
	高温加熱	高温長時間使用後の材料組織変化の程度を把握			溶接継手	
ナトリウム中 許容値バックアップのための試験	引張 クリープ破断 疲労 クリープ疲労	環境効果評価手法の策定		母材：板材	溶接継手	
ナトリウム中 材料の特性把握のための試験（確認・検証）	腐食 脱・浸炭	材料の安全裕度 健全性の確認			母材：板 溶接継手：板	

表 2.2.3-2　３１６ＦＲ鋼の試験項目別の試験計画

環境	試験項目	区分	1ロット当りのTP数	母材 T	母材 F(最弱部)	母材 F(最弱部)	母材 F(1/2or1/4)	母材 P	母材 P	溶着金属 TIG	溶着金属 TIG	溶着金属 SMAW	溶接継手 T-T TIG	溶接継手 T-F TIG	溶接継手 F-P TIG	溶接継手 F-P SMAW	溶接継手 P-P TIG	溶接継手 P-P TIG	溶接継手 P-P SMAW	総ロット数	試験評価の総試験量
		材料		T	F(最弱部)	F(最弱部)	F(1/2or1/4)	P	P	TIG	TIG	SMAW	T-T TIG	T-F TIG	F-P TIG	F-P SMAW	P-P TIG	P-P TIG	P-P SMAW		
		熱処理		AR	AR	AR	AR	AR	AR	AW	AW	AW	AW	AW	AW	AW	AW	AW	AW		
		TP採取条件		軸	主鍛	肉厚	主鍛	圧延	直交	横	縦	横	横	横	横	横	横	縦	横		
大気	引張	許容値策定	32本	1	2			4												7	224本
		許容値バックアップ	16本			2	2		2											6	96本
		確認・検証	16本							2	1	1		1	1		1	1	1	9	144本
	クリープ	許容値策定	10本					2												2	20本
	クリープ、クリープ破断	許容値策定	22本	1	2			4												7	154本
		許容値バックアップ	16本			1	1			1	1	1								5	80本
		確認・検証	16本		2															2	32本
	クリープ破断	許容値策定	4本					2												2	8本
		確認・検証	16本											1	1		1	1	1	5	80本
	疲労	許容値バックアップ	24本		1			2		1	1									5	120本
		確認・検証	8本														1	1		2	16本
	クリープ疲労	許容値バックアップ	36本		1			2		1	1									5	180本
		確認・検証	13本											1			1	1		3	39本
	応力緩和	許容値バックアップ	12本					1												1	12本
		確認・検証	4本								1									1	4本
	高温加熱 組織	確認・検証	15本														2			2	30本
	高温加熱 引張	確認・検証	60本														2			2	120本
	高温加熱 靭性	確認・検証	135n本														2			2	270n本
ナトリウム	引張	確認・検証	8本					1									1			2	16本
	クリープ破断	確認・検証	8本					1									1			2	16本
	クリープ疲労	確認・検証	8本					1									1			2	16本
	脱窒・脱浸炭	確認・検証	15本					1									1			2	30本
照射	引張	確認・検証	本					1									1			2	本
	クリープ	確認・検証	本					1									1			2	本
	クリープ疲労	確認・検証	本					1									1			2	本

熱処理記号　AR:As Recieved,　AW:As Welded

表 2.2.3-3　３１６ＦＲ鋼１ロット当たりの試験数算出根拠

試験項目	内　容	本数	算　出　根　拠	備	考
引　張	許容値策定	8~32本	4~16 温度 × 2繰返し (RT~800℃/50℃)	母材中心	・RT,500~600℃のデータのあるロットは採用
	許　容　値 バックアップ	8~16本	4~8 温度 × 2繰返し (RT、400~800℃/50℃)	採取位置、方向の影響確認	
	確認・検証	8~16本	4~8 温度 × 2繰返し (RT~800℃)	溶着金属、継手の強度確認	
クリープ	許容値策定	10本	3~5 温度 × 1~3応力レベル (500~700℃/50℃) (t_r=10^5,10^6,10^7h目標)	板母材のみ (任意時間で中断)	・RT,500~600℃の引張データのあるロットのデータは採用、但し、3温度び1温度で3点以上のデータのあるロット ・変形は板母材を中心に採取 ・溶着金属及び溶接継手の長時間データは標点距離内の組織観察結果を添付
クリープ及びクリープ破断	許容値策定	22本	3~5 温度 × 4~5応力レベル (550~650℃/50℃)(300,10^3,3×10^3,10^4,3×10^4h目標)	母材のみ	
	許　容　値 バックアップ	16本	3~4 温度 × 3~5応力レベル (500~650℃/50℃)(300,10^3,3×10^3,10^4,3×10^4h目標)	溶着金属の特性把握	
	確認・検証	16本		鍛造の強度、製法確認	
クリープ破断	許容値策定	4本	1 温度 × 4 応力レベル (750℃)　(300,10^3,3×10^4,10^4h目標)	母材のみ	
	確認・検証	16本	4 温度 × 3~5応力レベル (500~700℃/50℃)(300,10^3,3×10^4,10^4,3×10^4h目標)	継手の強度確認	
疲　労	許　容　値 バックアップ	12~24本	3 温度 × 4~8ひずみレベル (500,550,600℃)　(Δεt=0.3~2.0%)	母材、溶着金属の強度確認	・RT,500~600℃の引張データのあるロットのデータは採用 ・変形挙動は板母材中心 ・評価法は板母材及び板/板溶接継手を中心 ・溶接金属及び溶接継手の長時間データは標点距離内の組織観察結果を添付(特に、クリープ・疲労)
	確認・検証	8本	2 温度 × 4 ひずみレベル (550,600℃)　(Δεt=0.4~2.0%)	継手の強度確認	
クリープ疲労	許　容　値 バックアップ	36本	3 温度 × 1~3ひずみレベル×2ひずみ速度 (550,600℃他1)　(Δεt=0.6~2.0%)(0.01~0.001%/s)	ひずみ速度の影響 (低速-低速波)	
			3 温度 × 1~4ひずみレベル×1~3保持時間 (550,600℃他1)　(Δεt=0.6~2.0%)(tH=10~60min)	台形波の評価	
			3 温度 × 2 ひずみレベル×2波形 (550,600℃他1)　(Δεt=0.6~2.0%)(0.1~0.001%/s)	鋸歯状波の評価 (低-高速、高-低速)	
	確認・検証	13本	1 温度 × 2~4ひずみレベル×2ひずみ速度 (550,600℃)　(Δεt=0.6~2.0%)(0.01~0.001%/s)	継手の強度確認	
			1 温度 × 1~4ひずみレベル×2保持時間 (550or600℃)　(Δεt=0.6~2.0%)(tH=10~60min)		
			1 温度 × 2 ひずみレベル×2波形 (550or600℃)　(Δεt=0.6~2.0%)(0.1~0.001%/s)		
応力緩和	許　容　値 バックアップ	12本	3 温度 × 4 (ひずみ or 応力)レベル (550,600℃他1)	構成式から作成するSr値の検証	・板母材中心
	確認・検証	4本	1 温度 × 4 (ひずみ or 応力)レベル (550℃)	溶着金属	
高温加熱 引張	確認・検証	60本	15 加熱条件 × 2 温度 × 2 繰返し (RT,550 or 600℃)	溶接継手	・加熱温度(500~650℃) ・加熱時間(0.1000,3000,6000,10000,20000,50000) ・継手ノッチ位置 (Dep., Bond, BM)
高温加熱 靭性	確認・検証	135n本	15 加熱条件 × 3 温度 × 3 繰返し × n (たとえば、-20℃, 0℃, 20℃)	溶接継手	
高温加熱 組織観察	確認・検証	15本	15 加熱条件 × 1 繰返し	溶接継手	

表 2.2.3-4　ＤＤＳ（案）における材料データ取得の考え方

試験項目	DDS（案）における考え方		
クリープ破断	ヒート数	・「ばらつき」を考慮し，実機主要構造部材である板材(代表製品形状とする)で十分なヒート数。 ・実機ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘ部材となる板，管，鍛造各ヒートを含み，十分なヒート数	４以上 10 以上
	温　度	・１ヒート内での外挿が可能な温度レベル数を各ヒートで確保。 ・「ばらつき」及び外挿性を考慮し，代表製品形状の１ヒート以上で温度レベル数５以上。 ・温度レベルは実機設計温度とこれより５０℃以上上限温度を含む。	３温度以上 １ﾋｰﾄ以上 500, 550, 600℃
	時　間	・長時間側への外挿精度を高めるため，各温度ともある程度以上長時間のデータを含む。 ・代表製品形状，代表ヒートに対し，設計時間の 1/10 以上の時間データを含む。 ・将来的には基準案の妥当性確認として，可能な限り長時間データを採取。	> 6000h 2～30000h 10^5h
	データ点	・長時間データを含み，定式化の信頼性確保できる点数。	１ﾋｰﾄ10 点以上 全体 100 点以上
クリープひずみ	－	・基本的にはクリープ破断と同じ。 ・代表製品形状，代表ヒートに対し，設計寿命の 1/2 位の破断応力下での変形データを含む。	10^5h 破断応力下
高温疲労	ヒート数	・「ばらつき」を考慮し，代表製品形状で十分なヒート数。 ・実機ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘ部材となる板，管，鍛造各ヒートを含み，十分なヒート数(標準的試験片によるデータ取得可能な製品形状)	４以上 10 以上
	温　度	・１ヒート内での外挿が可能な温度レベル数を各ヒートで確保。 ・「ばらつき」及び外挿性を考慮し，代表製品形状，代表ヒートについては温度レベル数５以上。	４以上 １ﾋｰﾄ以上
	データ点	・標準ひずみ速度(10^{-3}㎜/㎜/s)データに対して，十分な信頼性，外挿性を確保できる点数。 ・信頼性，外挿性確保のために，代表ヒートに対し，数種類のひずみ速度データの蓄積。 ・低ひずみ範囲側への外挿性向上のため，10^5 サイクル以上 10^6 サイクルまでのデータの確保。 ・Ｂ，Ｃ線図の信頼性確保のため，10^{-6}㎜/㎜/s 以下のひずみ速度データの拡充。	１ﾋｰﾄ５点以上 ４種類以上 ５点以上 ３点以上

表 2.2.3-5　３１６ＦＲ鋼に関する取得データ量（平成１０年度終了時点）

材料特性	母材		溶接部	
	取得データ	基準化検討に用いたデータ	溶接金属取得データ	溶接継手取得データ
クリープ破断	１４０	１２１	４８	５２
第３期クリープ開始時間	１１６	１０３	３５	１３
定常クリープ速度	１１９	１０４	３５	１３
クリープひずみ	１１６	１０１	３２	１３
応力緩和	１０	１０	１	１
低サイクル疲労	１６２	１５７	３２	２９
クリープ疲労	４２	—	９	１１
引張強度	２２９	１５４	４４	３２
弾塑性応力－ひずみ	２２３	３８	４４	１０
動的応力－ひずみ	１６２	—	３２	２９

表 2.2.3-6　長時間保持クリープ疲労試験

材料	試験温度(℃)	ひずみ範囲(%)	保持時間(h)
316FR鋼板母材	550	1.0	100
		0.6	1
			3
			6
			10
		0.4	0.167

表 2.2.3-7　大気中クリープ疲労試験

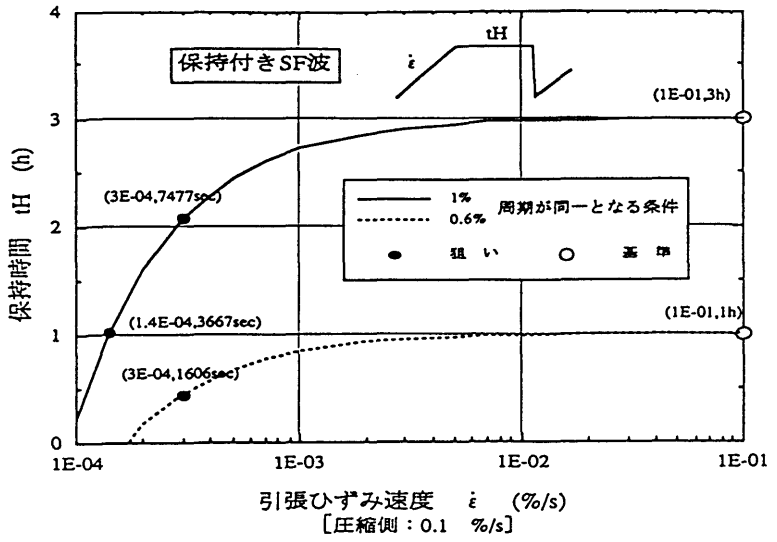
材料	温度(℃)	全ひずみ範囲(%)	引張ピークひずみ保持		SF波*1	中間保持*2
			0.5hr	3hr		
316FR鋼板母材	550	0.6	●		●	●:ひずみ0 ●:圧縮
		1.0	●	●	●	

*1：S＝3×10⁻¹(%/sec)，F＝5×10⁻²～1×10⁻¹(%/sec)

*2：ひずみ保持位置2箇所(圧縮ピークひずみ保持，引張過程ひずみ0保持)，保持時間 t_H＝0.5時間

＿：金属組織及び破面観察*) 実施

表 2.2.3-8　保持付きSF波クリープ疲労試験



316FR鋼板母材 (FR－P03材) 550℃		台形波	保持付きSF波(1)		保持付きSF波(2)		保持付きSF波(3)*		SF波(4)*	
		tH	ε̇ (%/秒)	tH(hr)	ε̇ (%/秒)	tH(hr)	ε̇ (%/秒)	tH(hr)	ε̇ (%/秒)	tH(hr)
ひずみ範囲	1.0%	3h ●	3×10^{-4}	2.07 ●	1.4×10^{-4}	1.02 ●	1.0×10^{-4}	1.0 ●	1.0×10^{-4}	0 ●
	0.6%	1h ●	3×10^{-4}	0.45 ●	－	－	1.0×10^{-4}	1.0 ●	1.0×10^{-4}	0 ●

＊：金材技研共研「高速炉構造用SUS316の評価研究(その8)」で実施。

表 2.2.3-9　真空中クリープ疲労試験

材料	温度(℃)	全ひずみ範囲(%)	低サイクル疲労	引張保持	SF波*1
316FR鋼板母材	550	1.0	●	●	●

*1：S＝3×10^{-4}(%/sec)，F＝5×10^{-2}～1×10^{-1}(%/sec)，真空度10^{-7}～10^{-5}Pa

表 2.2.3-10　低ひずみ速度引張試験

試験項目	材料	温度(℃)	ひずみ速度(%/S)					
			10^{-1}	10^{-3}	3×10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
低ひずみ速度引張	316FR鋼板母材	550	●	●	●	●	●	●

●：金属組織および破面観察*) 実施

表 2.2.3-11　中止めクリープ疲労試験

材料	温度(℃)	波形	全ひずみ範囲(%)	中止め条件（n/N_f）				中止め材の低ひずみ速度引張(3×10^{-4}%/sec)
				0.1	0.25	0.5	0.75	
316FR鋼板母材	550	0.5時間保持	0.6	●	●	●	＼	●
		3時間保持	1.0	●	●	●	＼	●
		SF波	0.6	●	●	●	＼	●
			1.0	●■	●■	●■	＼	●
		FF波	0.6	●	●	●	●●	●
			1.0	●	●	●	●	●

●：大気中，■：大気中 中止め後，試験片表面を研磨し，低ひずみ速度引張試験を行う。
注）各試験とも中止め後，試験片表面のき裂分布状況と最大き裂長さを記録する。

表 2.2.3-12　応力漸増･漸減クリープ試験条件

材料(℃)	温度	試験項目	ステップ1	ステップ2	ステップ3
316FR鋼板 母材	550	漸増 (1)	σ_3, 900h (Dc=0.09)	σ_2, 2000h (Dc=0.4)	σ_1, 破断まで (1500h, Dc=0.5想定)
		漸増 (2)	σ_3, 300h (Dc=0.3)	σ_2, 2000h (Dc=0.4)	σ_1, 破断まで (900h, Dc=0.3想定)
		漸減	σ_1, 900h (Dc=0.3)	σ_2, 2000h (Dc=0.4)	σ_3, 破断まで (3000h, Dc=0.3想定)

σ_1=324MPa (33.0kgf/mm^2, t_R= 3000h想定)
σ_2=309MPa (31.5kgf/mm^2, t_R= 5000h想定)
σ_3=294MPa (30.0kgf/mm^2, t_R=10000h想定)

表 2.2.3-13　ＳＥＭ連続観察試験

材料	種類	温度(℃) 550	引張ストローク 保持時間(hr)	制御Δδ (ストローク制御)
316FR鋼板 母材	処女材	●	1/2	N_f=200cycle相当
	クリープ損傷付与材	●		

表 2.2.3-14　応力緩和に及ぼす保持直前のひずみ速度依存試験

材料	温度(℃)	ひずみ速度(%/sec) 10^{-1}	 3×10^{-4}
316FR鋼板 母材	550	●	●

注) 繰返し硬化($\Delta\varepsilon_t$=1.0%, N=100)後, +0.5%でひずみ保持(t_H=100h)

表 2.2.3-15　繰返し硬化後のクリープ特性試験

材料	温度(℃)	想定破断時間(h)		
		1000	3000	10000
316FR鋼板母材	550	●	●	●
	600	●	●	●

注）繰返し硬化($\Delta\varepsilon_t$=1.0%, N=100)後，クリープ試験を行う。

クリープ試験の試験条件は以下の通り

想定破断時間(h)	試験温度	
	550℃	600℃
1000	σ=383MPa(39.0kgf/mm²)	σ=289MPa(29.5kgf/mm²)
3000	σ=353MPa(36.0kgf/mm²)	σ=260MPa(26.5kgf/mm²)
10000	σ=319MPa(32.5kgf/mm²)	σ=235MPa(24.0kgf/mm²)

表 2.2.3-16　粗粒板材の低サイクル疲労試験

材料	結晶粒度	温度	Δεt
316FR鋼板材	Gs.No.1	550	0.45
		550	0.4
		550	0.35

表 2.2.3-17　加熱時効材の強度試験

材料	時効後試験	温度	速度
316FR鋼板材(時効条件：550L×50000h)	SSRT	550	2.8E-4%/s
		550	1.1E-4%/s

材料	時効後試験	温度	Δεt(%)
316FR鋼板材(時効条件：650℃×3000h)	LCF	550	1
		550	0.7
		550	0.6
		550	0.5
		550	0.45

表 2.2.3-18　溶接継手ひずみ分布測定試験

550℃		ステップ1			ステップ2		
制御ひずみ範囲 Δε(%) [GL=50mm]		0.5	0.7	1.0	1.0	0.7	0.5
ΔN(サイクル)		1000	100	100	33	73	240
高温変位計	GL2[GL=2mm]	① ②			③ ④		
		⑤					
	GL15[GL=15mm]	GL15					

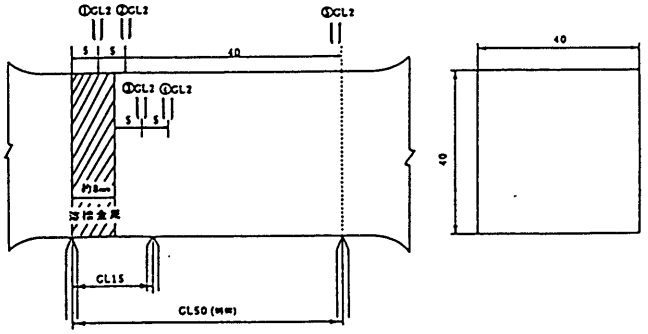
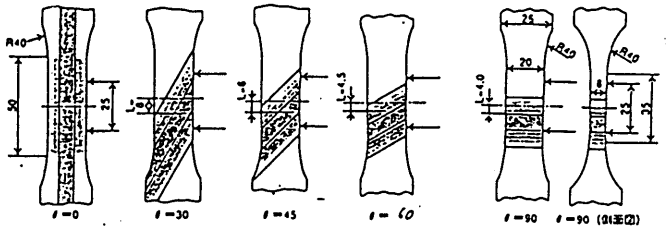


表 2.2.3-19　溶接継手寸法効果試験

T (℃)	Δε (%)	GL中のWM, HAZ, BM割合
550	0.5	① HAZ+WM+HAZ ② HAZ+WM ③ HAZ+WM
	1.0	④ BM+HAZ ⑤ BM+HAZ
		GL=25mm

表 2.2.3-20　負荷方向強度差試験

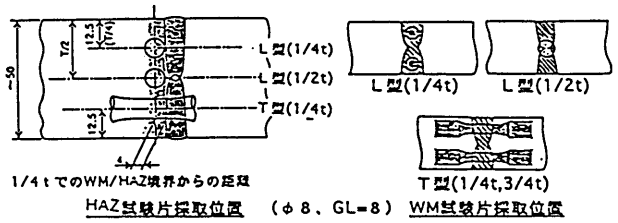
T (℃)	Δε (%)	負荷方向とビード方向の角度				
550	0.5	0	30	45	60	90
アンダーラインはＦＣＩ(0.5h)も計画						



GL=25, GL 中央：WM/HAZ境界よりHAZ側へ4mm.

表 2.2.3-21　継手各部の疲労特性取得試験

T (℃)	材　料		Δε (%)					
			～0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2
550	BM		−	○	○	○	○	○
	HAZ	L	○□	○□	−	○□	○	−
		T	○	○	○	○	○	−
	WM	L	−	○□	−	○	○□	−
		T	○○	○	○	○	○	−
○：1/4t，3/4tより採取，□：1/2tより採取								



HAZ試験片採取位置　(φ8、GL=8)　WM試験片採取位置

表 2.2.3-22　継手各部のクリープ特性取得試験

材料	方向	温度(℃)	本数	備考
溶接金属	L	550	1	クリープ
		650	1	
	T	550	3	クリープ (～500h変形のみ)
		550	3	ラプチャー
HAZ	L	550	6	クリープ
		650	4	
	T	550	5	ラプチャー
		550	3	クリープ (～500h変形のみ)
		650	3	
溶接継手	L	550	3	クリープ
		650	2	
	T	550	1	クリープ

クリープ：変形＋破断時間

ラプチャ：破断時間のみ

表 2.2.3-23　継手各部のクリープ疲労試験

材料	方向	温度(℃)	ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$(%)	保持時間 t_H(h)
溶接金属	L	550	1.0	3
	T			
HAZ	L			
	T			
溶接継手	L			
	T			