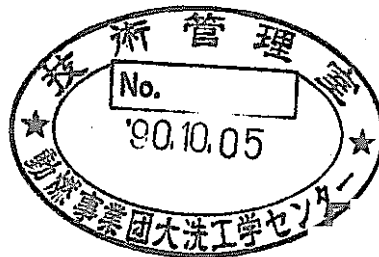


海外出張報告

- 第10回 国際原子炉構造力学会議 (SMiRT会議)
(米国、カリフォルニア州、アナハイム、1989年8月14日~18日)
- 第3回 設計基準と構造工学に関する国際セミナー
(米国、カリフォルニア州、アナハイム、1989年8月21日~22日)
- 第7回 非弾性解析、破壊、および寿命予測に関する国際セミナー
(米国、カリフォルニア州、サンタバーバラ、1989年、8月21日~22日)



1990年7月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9600 90-001
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1990年7月

第10回 国際原子炉構造力学会議 (SMiRT会議)

(米国, カリフォルニア州, アナハイム, 1989年8月14日～18日)

第3回 設計基準と構造工学に関する国際セミナー

(米国, カリフォルニア州, アナハイム, 1989年8月21日～22日)

第7回 非弾性解析、破壊、および寿命予測に関する国際セミナー

(米国, カリフォルニア州, サンタバーバラ, 1989年8月21日～22日)

今津 彰1), 笠原 直人2), 浅山 泰3)

要 旨

SMiRT会議は原子力の構造力学の分野における一大国際会議であり、2年に一度開催され、高速炉だけを対象としたDivisionもある。また各分野のより専門的な内容を扱うセミナーが関連して開かれる。

本会議には34カ国から700名あまりが参加した。高速炉の分野では日・仏が主要な貢献を果たした。

PNCからはコーディネイタおよび座長として会議の運営に参加するとともに、クリープ疲労、溶接継手、管板に関する最新の研究開発成果を発表して評価を受け、PNCの研究成果の先導性を確認できた。

セミナーに関しては標記の2つの会議に出席し、高速炉用高温構造設計の高度化と破壊力学に関する発表を行い、各分野の専門家との意見交換を行った。

これら学会発表聴講および関係者との議論により関連技術分野の動向を把握し、今後の事業団における研究開発に反映するための有益な情報を得た。

また多くの技術者、研究者との交流を通して有益な情報交換を図るとともに、引続きの情報交換を行う基盤を築くことができた。

-
- 1) 現 本社動力炉建設運転本部
 - 2) 大洗工学センター機器構造開発部構造工学室
 - 3) 大洗工学センター機器構造開発部材料開発室

目 次

I.	概 要	1
1.	概 要	1
2.	会議の概要	1
3.	出張目的	2
4.	会議運営への参加	3
5.	本会議	3
5.1	序	3
5.2	発表論文と反響	3
5.3	全体的動向と事業団業務への反映	5
6.	設計基準と構造工学に関するセミナー	8
6.1	序	8
6.2	発表論文と反響	8
6.3	全体的動向と事業団業務への反映	9
7.	非弾性セミナー	9
7.1	序	9
7.2	発表論文	10
7.3	全体的動向と事業団業務への反映	11
7.4	まとめ	11
II.	各技術分野の動向	18
1.	Division E (Fast Reactor Core and Coolant Circuit Structures)	18
1.1	概 要	18
1.2	各 論	18
1.2.1	設計	18
1.2.2	熱構造解析	19
1.2.3	炉体耐震	21
1.2.4	炉心耐震	21
1.2.5	設計評価法	22
1.2.6	座屈	23
1.2.7	安全	23

2. Division F (LWR Pressure Components)	23
2.1 概要	23
2.2 各論	23
3. 破壊力学 (D i v. G)	24
3.1 概要	24
3.2 各論	24
3.3 まとめ	25
4. Division L (Inelastic Behavior of Metals and Constitutive Laws of Materials)	25
4.1 概要	25
4.2 各論	26
5. その他	30
5.1 概要	30
5.2 各論	30
5.3 まとめ	31
6. Seminar on Construction Codes and Engineering Mechanics (Seminar 15)...	31
6.1 概要	31
6.2 各論	31
7. セミナー 5 (非弾性解析、破壊と寿命予測)	33
7.1 概要	33
7.2 各論	34
8. まとめ	35
付 録	37

I. 概 要

1. 概 要

第10回国際原子炉構造力学会議（SMiRT会議）とセミナーに出席し、その運営に参加するとともに、クリープ疲労、溶接継手、管板、破壊力学等の評価法に関する事業団の最新の研究開発成果を発表して評価を受け、今後の研究開発の方向性、レベルの向上に有効に反映することができた。また学会発表聴講および関係者との議論により、関連技術分野の動向を把握し、今後の研究開発に反映するための有益な情報を得た。

またこの会議を通じて多くの技術者、研究者と旧交を温め、または新たに知遇を得て有益な情報交換を図るとともに、引き続きの情報交換を行う基盤を築くことができた。

2. 会議の概要

(1) 会議名

- 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology（第10回国際原子炉構造力学会議）
- Post Conference Seminar
 - ‘Construction Codes and Engineering Mechanics’（セミナー15）
 - ‘Inelastic Analysis, Fracture and Life Prediction’（セミナー5）

(2) 主催者

原子炉構造力学会議国際組織委員会

(3) 開催年月日

- 1989年8月14日～8月18日（本会議）
- 1989年8月21, 22日（セミナー）

(4) 開催場所

- 米国, カリフォルニア州, アナハイム, ヒルトンホテル（本会議, セミナー15）
- 米国, カリフォルニア州, サンタバーバラ, カルフォルニア大学（セミナー5）

(5) 会議の特徴

下記のような広範な対象分野，技術分野，対象構造をマトリックス的にカバーし，毎回1000名以上が参加する原子力の構造力学の分野での総合的な一大国際会議である。高速炉だけを対象にしたDivisionもある。2年に1回開催される。

- ・対象分野・・・軽水炉，高速炉，核融合炉，廃棄物処理等
- ・対象構造・・・原子炉，冷却系構造，燃料，コンクリート，非金属材料
- ・技術分野・・・計算力学，破壊力学，非破壊検査，熱流動，流力振動，非弾性解析，耐震／免震，安全，確率論，原子炉の運転実績と寿命延長等

(6) 会議の概況

- 1) 34箇国から700余りが参加した。これは従来1000～1500名程度の参加者があったことに比べると著しい減少である。
- 2) 内訳は米国206名，日本136名，仏90名，西独69名がおもなところである。
- 3) 日本からは大学，建設会社，プラントメーカー，民間研究機関の順に参加者が多い。
- 4) 発表論文数では耐震関係が最も多く，次いで計算力学，破壊力学，苛酷荷重，高速炉の順となっている。新しい傾向としてはプラントの運転経験や確率論的評価が盛んとなっている。
- 5) 高速炉分野の発表論文数は仏18件，日本12件，米6件，伊6件等で全体で47件であった。質・量とも日仏が圧倒的な貢献をした。

各国別の各Divisionごとの論文発表件数のリストを表1に，また高速炉分野でのマクロな動向（テーマ・国別論文数）を表2に示す。

3. 出張目的

- (1) 高速炉の構造評価上の重要な課題であるクリープ疲労評価法，溶接継手の評価法，管板の解析評価法，破壊力学評価手法等についての動燃の最新の研究開発成果を発表し，広く専門家の評価を受けるとともに，この分野で動燃が技術的リーダーシップを取る。
- (2) 今津はD i v. E (F B R分野)のDivision Coordinator としていくつかのセッションの座長を務める等会議の運営に参加する。
- (3) 会議を通じてF B Rの材料，構造解析，強度評価等の分野での最新の情報を収集して研究開発計画や評価に有効に反映させる。

4. 会議運営への参加

今津は会議運営に関し以下を行った。

- (1) Division E および Division F のいくつかのセッションの座長を務めた。
- (2) 特別講演 (Principal Lecture)として新旧4名のDivision Coordinatorが執筆した 'Advances in the Analysis of Fast Reactor Core and Coolant Circuit Structures' の序論の部分の講演を行った。
- (3) コーディネータ会議に参加して会議の運営上の問題点と対策について協議した。
- (4) その他コーディネータとして担当するDivisionを取り仕切った。

5. 本会議

5.1. 序

本会議では今津が溶接継手の疲労評価法, 笠原が管板の解析評価法 (招待講演), 浅山が 21/4Cr-1Mo 鋼のクリープ疲労評価への有効応力の適用について論文発表を行った。論文の表題とその要旨を表3に示す。

5.2. 発表論文と反響

- (1) Fatigue Damage Evaluation of Welded Joints under Thermal Stresses at Elevated temperatures (今津)

(内容) 溶接継手の評価法については必要性は認識されながらも有効な方法が存在しなかった中で, 独特な力学モデルに基づく手法を提案するとともに, 原子炉容器の液面近傍の熱応力に適用して各種設計係数を定めた。

(反響) 材料のミクロ的な面に立ち入らず, 母材と溶接金属の機械的性質に着目する力学モデルであることと, 通常の常識に反して繰り返し荷重下では溶接金属の方がむしろ柔らかいという事実に立脚するので, 新鮮な驚きをもって迎えられた。溶接残留応力の影響, 今後のクリープ疲労評価への展開方策等について質疑があった。

- (2) High Temperature Design Method for Tubesheet Structure with Validation by Thermal Transient Testing (笠原)

管板の高温構造設計法に関して事業団で開発した手法と実験による検証の結果を

発表した。本発表の要点は以下の通りである。

- 1) 3次元構造である管板の簡易2次元温度解析法を開発した。
- 2) 管板の多孔部分の全体挙動を模擬する等価非弾性物性値と、等価非弾性物性値を用いた管板構造の簡易非弾性解析モデルを開発し、詳細解析法によって検証を行った。
- 3) 一般部の高温構造設計基準との整合性を考慮した、弾性解析ベースの管板構造用設計評価法の提案を行った。
- 4) 空気冷却熱過渡試験装置を用いて、管板構造モデルの熱過渡挙動試験を行い、熱過渡時の温度分布および集中部でのひずみの測定に成功した。また試験データを用いて提案した設計評価法の検証を行った。

発表後フランスにおいても管板の設計はプラントコンパクト化の課題となっているようであり設計上の重要な問題であるとのコメントをうけた。また同分野の研究者とのディスカッションから、本研究における重要なテーマである歪集中係数に関して米国等の方法に比較して実機設計への適用という点で進んだものとなっていることが分かった。

差異が生じた理由は事業団の研究が設計への適用を強く意識したものであるのに対し、他のものは現象の解明を念頭においたものであることが考えられ、今後の意志の疎通が必要であると考えられる。

- (3) 浅山, 朝田「 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼のクリープ疲労損傷評価に対するオーバーストレス概念の適用」, 本会議, Divison L

(内容) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼のクリープ疲労損傷の先進的評価手法に関する論文である。本論文の特徴は次の3点に要約できる。

- 1) クリープ疲労試験を 10^{-9}mbar という高真空中で実施し、大気による環境効果を受けないデータを取得した。これは通常のクリープ疲労データは大気環境中で取得されたものであり、純粋なクリープ疲労相互作用の他に大気による環境効果を含むことにより、その評価が必ずしも容易でないためである。
- 2) 1)の結果は、オーバーストレスなる概念を適用すれば高精度で評価できる。
- 3) 1)~2)で得られた結果は、大気その他による環境効果を定量的に評価するための基礎データとなる。

(反響) 貴重なデータを用いて明快な結論を導出したことに対して高い評価を受けた。国内外の著名な研究者より質疑およびディスカッションを受けた。アメリカ

(McDwell, ジョージア工科大) では最近になって同様の研究を開始しており, 本研究の先駆性を改めて確認した。

5.3. 全体的動向と事業団業務への反映

(1) Division E (高速炉分野)

- 現在は高速炉の研究開発を質量ともリードしているのは日本と仏である。日本からは電中研-MITの免震と座屈に関する論文が多く発表された。動燃の管板と溶接継手の評価法に関する2件の論文はレベルの高いもので, 本会議で高い評価をうけ, 動燃の研究開発成果の先導性を再確認できた(管板の論文は招待講演)。
- EFRの設計の進捗が報告された。(図1)設計合理化の要は構造健全性面からの成立性であり, このため炉内の熱流動と設計基準の高度化による設計成立範囲の拡大を重視して研究開発を精力的に実施している。
- 特に後者については, 欧州の統一基準となる仏のRCC-MRの高度化のためカドラシュを中心にして系統的な熱過渡強度試験(5基のナトリウムループ)を含めた研究開発を強力に実施している。(図2)高度化のアプローチも日本と類似である。小型モデルを用いた構造要素試験は多数実施しているが, TTSのような実構造に近いモデルを用いた試験は欧州でも行えない。評価手法の検討については注意深い一連の計画に沿って着実に進めていることが今回の幾つかの論文でも示されており, 参考になるところが多かった。
- 仏のサクレイでは主として炉内構造について複合荷重下での座屈に関する研究を応用のきく解析手法の開発に主眼を置きながら着実に進めている。(図3, 図4)このやり方は規模こそ違いが動燃のアプローチと一致している。
- 欧州では研究開発が設計と緊密な連携をとりながら実施されている。例えば新しい評価法が提案されると設計でクリティカルとなっている問題にそれを適用して, 研究開発の効果や問題点を検討している。
- 欧州とのこの分野での協力は相互補完という面でも極めて有効であるとの確信を更に深めた。

(2) Division F (LWR Pressure Components)

- このDivisionでは, 主として軽水炉を扱っており, 内容は圧力下での熱衝撃, 配管の疲労試験および解析, プラントへの適用を念頭においた環境効果の評価, 圧力容器の設計, 熱応力および疲労をうける圧力容器の解析・設計, 蒸気発生器,

昇圧器の解析等である。

- 研究の観点、方法はバラエティに富んでおり、材料試験片レベルのものから構造物試験レベルのものまで様々であるが、その手法としては、破壊力学によるアプローチを採ったものが多い。破壊力学の実機への適用という点では、高速炉よりも軽水炉分野の方が進んでいるといえる。
- この分野では、実験⇒詳細解析⇒簡易法の開発という流れのうち、詳細解析のしめる割合が比較的小さく、実験を直接簡易法で評価しようとする傾向が見られた。
- 設計基準の構築あるいは高度化という観点からは、今回の発表には深く突っ込んだものがほとんど見られず、物足りないという印象を受けた。
- ただしORNLなどはき裂のアレストが生じる靱性値を比較的小型の試験片から決定する手法に関する発表をおこなうなど、興味深い動きもあり、今後もこの分野の動向を注視する必要は大きい。

(3) 破壊力学 (d i v. G)

破壊力学分野の発表が行われる d i v. G で最も多かったのは破壊力学パラメータの数値解析法に関するものであった。線形破壊力学パラメータに関しては構造物中の表面き裂や複数き裂の解析法等ほぼ実機に近いレベルの問題への適用が行われていた。非線形破壊力学に関しては、弾塑性状態での表面き裂等複雑な問題への適用と簡易評価法に関するものが中心であった。しかしクリープき裂進展解析に関するものはなかった。数値解析の分野では東洋人の発表が多く特に中国からの論文が目立った。

また実機への適用という点では軽水炉の分野で、L B B の立証を目的とした構造要素試験とその解析に関するものが紹介されていた。特に西独 M P A のエルボ試験が実験、解析共に高いレベルのものであった。

これに対し、高温で運転される高速炉で支配的となるクリープき裂進展に関する発表は数も少なく、研究は基礎的なものに限られていた。ただしポストセミナーにおいて、英国より実機における荷重モードに着目した先進的な研究発表があり、詳細を後で述べる。

破壊力学の分野は軽水炉におけるニーズに焦点をあてた領域ではかなりの量の研

究がされているが、高温破壊力学の実機への適用はこれからの研究課題と考えられる。

PNCとしては高温破壊力学に関して材料と実機の間をうめる構造要素試験を自ら実施するとともに、高速炉の特徴とニーズを研究者に明示し、実機へ適用可能な方法の開発意欲を刺激する必要があると考えられる。

(4) Division L (Inelastic Behavior of Metals and Constitutive Laws of Materials)

このDivisionは材料の非弾性挙動および構成則に関するものであり、クリープ疲労相互作用等が中心テーマである。

おもな発表国はフランス、日本であった。イギリスも着実な成果をあげていたが、アメリカはやや低調であった。

従来この分野では比較的単純な環境・負荷条件下での実験およびこれに基づく解析が主流であったが、今回の内容は実験および解析ともより高度あるいは広範な条件下におけるものが主流となっており、ここ2～3年におけるこの分野の進歩が顕著であった。具体的には、最も古典的な条件である大気中単軸引張圧縮試験に関する発表はほとんどなく、より一般的でありかつ実機の条件に近いと考えられる多軸状態に関するものが多く、環境もナトリウム中や真空中といった実機条件の評価をより精密に行うためのものに広範化している。また、構成則に関しては、実験とは独立して解析のみで検討したものも見受けられた。

日本、イギリスは材料力学的観点に基づく発表が多かったが、フランスはどちらかというところそれらの実機条件への適用といった観点からの発表が多かった。今後この二つの観点を統合して、材料力学的な基礎的知見をスムーズに実機の解析に結びつける作業が極めてホットなポイントとなると考えられる。

このような動向に対するPNCのレベルは非常に高いと言える。PNCは上述の負荷条件あるいは環境条件の高度化に対応する材料試験設備をすべて有しているばかりでなく、これらを用いた試験データの蓄積も相当程度まで進んでいる。また一方で広範な条件下で高度な構造物試験を極めて豊富に行っている。従って今後一つの重要な焦点となる上述の材料力学的な基礎的知見をスムーズに実機の解析に結びつける作業において、PNCはいままでにもまして集中的なR&Dを行い、リーダーシップを発揮する必要がある。

(5) その他（蒸気発生器 Div. D, 構造信頼性 Div. M）

Div. Dの運転経験に関するセッションの中でPWR蒸気発生器の破損調査結果とそのランク付け, 対策に関する発表があった。満室の状態で活発な議論が行われており, 現実的な問題として蒸気発生器の破損対策は重要な問題であることが伺えた。内容は各国の破損データに基づいたものであるため大洗で計画中の2重管蒸気発生器のR&D実施に際して参考になると考えられる。発表はやはり多くのプラントを有する米国からのものが多かった。

Div. Mの構造信頼性に関しては建築, 土木分野の発表多く, 設計への適用に関するものも含まれていた。確率論的破壊力学については, 確率計算の効率化に関するものがあつた他, 破壊力学パラメータの計算法に関しては特に目新しいものはなかった。

蒸気発生器に関しては, 今回の発表を聞いても破損箇所, その要因ともに様々であり構造健全性に関するR&Dを展開するには的が絞りにくいテーマであることが分かる。このため各国のデータを検討することによりテーマの重み付けをしていく必要があるかと考えられる。

6. 設計基準と構造工学に関するセミナー

6.1 序

'Construction Codes and Engineering Mechanics'という名称の本セミナー (Seminar No.15) は今回で第3回を数え, Farr (米国 Babcock & Wilcox), 朝田教授 (東大), Larsson (CEC), Roche (仏, CEA) がCo-organizerを務めるものである。内容は軽水炉, 高速炉, 高温ガス炉等の設計基準や材料強度基準およびそれに関連する構造解析, 材料特性, 構造強度等である。毎回30~40人の専門家が参加しこの分野の課題について詳細な発表と議論がなされる。第1回には永田主研が, また第2回には渡士主研が参加した。

今回は今津が参加し, 大洗で実施している高速炉の高温設計基準の高度化作業の最近の成果を発表した。

6.2 発表論文と反響

'Advancement in Elevated Temperature Structural Design Code for FBR' (永田, 今津)

(内容) 繰り返し荷重下での弾性挙動を示す応力範囲条件 (シェイクダウン基準) を従来より拡大できること, および過渡熱応力での除荷過程を考慮した合理化されたクリープ疲労評価法を新しく提案し, それによる許容応力の拡大効果を述べた。
(反響) 難解な (ロジックを追いかけていけないと全体が理解できない) 論文であり中国の教授から詳細に質問を受けた。最終的には理解と共感を得た。関連する米国の論文 (FFTFとCRBRのコンポーネントの設計評価への非弾性解析の適用) ではクリープ損傷評価における保守性の配慮に不十分な所があり, 論争となったが, 概ねこちらの主張が認められた。

6.3 全体的動向と事業団業務への反映

- (1) 高温構造設計基準の開発に関しては米国の活動は微々たるもので, 過去の遺産で食っている感じである。基準全体の体系的活動という点では欧州特に仏の進歩が目ざましい。CEAのアプローチは基本的にはPNCのそれに近く, 実験も含め体系的な研究開発を進めている。
- (2) 英国は基礎的材料工学の面で着実な独自研究を行っている。また4年という長期間のクリープ疲労試験データも得られつつある。しかし英国の評価法は欧州内でもまだコンセンサスは得られていない。
- (3) ASME Sec. IIIやXIの範囲内では米国内で引き続き細々ながら改訂作業が進められている。しかし実務を行うチャンスが著しく少なくなったため, 新世代の専門家が育っていないので技術の継承を目指してドキュメント作りの作業を実施しているという状況が印象的である。

7. 非弾性セミナー

7.1 序

本セミナーの正式名称は非弾性解析, 破壊, 寿命予測に関する第7回 国際会議であり, SMIRTポストセミナーの中でも長年続いおり同分野の先導的な専門家が集まる。今回の発表内容も本会議より全体に高度で議論も非常に活発であった。

このため実質的な技術討論を行うには本会議より適していると考えられ, 今後目的に応じて本会議との力配分を考えるべきであろう。本セミナーの発表論文はさらにこの分野での権威ある専門雑誌 (NED) に掲載されることになっている。

7.2 発表論文

- (1) 朝田, 島川, 北川, 小平, 和田, 浅山 「SUS304鋼のクリープ疲労におけるJ積分の解析的評価手法」, ポストセミナー5, Session A

(内容) SUS304鋼のクリープ疲労におけるJ積分を解析的に求める研究例は現状ではごく少ない。本件はこの簡易法の提案に関する論文である。本件はPNCの日本溶接協会に対する委託研究(FCC委員会)の成果である。特徴は以下の通り。

- 1) 一般に繰り返し負荷下のJ積分は部材の各点について予め実験により求めたヒステリシス・ループによって求めるが, これはかなり煩雑な作業である。そこで本論文ではJ積分を繰り返し応力ひずみ曲線から求めることを提案した。これにより作業は大幅に簡略化される。
- 2) 1)で提案した手法の有効性を試験データとの比較により示した。

(反響) シンプルな手法に基づき高精度でJ積分を評価する本提案の有効性はイギリスをはじめとする高名な専門家に認められ, 本手法をより一般化, 高度化するための建設的提案を受けた。

- (2) 朝田, 北川, 島川, 小平, 和田, 浅山 「日本のFBR材料の高温き裂進展試験の手法の標準化」, ポストセミナー5, Session C

(内容) 高温におけるき裂進展試験は研究者間で方法が異なり, データの相互比較が困難であるのが現状である。そこで本件は日本のFBR材料の高温き裂進展試験の手法の標準化に関して事業団が取得した豊富な試験データに基づき, 細部に渡るまで具体的提案を行ったものである。本件もFCC委員会の成果である。特徴は以下の通り。

- 1) 表記試験の手法の広範囲(試験片形状, 試験片サイズ, 加熱方法, 温度分布, サイドグループの有無及び形状, 予き裂の有無, 形状および導入方法等)について, 極めて豊富な実験データに基づき, 最も効率良く試験を行うために最適と思われる標準値を具体的に提案した。

(反響) き裂進展の分野の著名な研究者よりディスカッションを受け, 彼らが本論文で提案した標準試験法およびその根拠として示した長時間試験を含む豊富なデータに強い関心を持つとともに高く評価していることが認識できた。

- (3) Analytical Crack Growth Evaluation of Plate with Surface Crack

(渡士 代読笠原)

高速炉ホットレグ配管エルボ部の想定漏洩口の合理的設定に反映することを刻的

に行った表面き裂のクリープ疲労き裂進展解析に関する研究を発表した。以下に要点を述べる。

- 1) エルボのシェル解析を行い、想定き裂を表面き裂付き平板で模擬できることを示した。
- 2) アスペクト比と荷重条件の組合せにより計54種類の表面き裂の3次元解析と破壊力学パラメータ計算を行いデータベースを作成した。
- 3) データベースと内挿法を用いて実機条件化でのき裂進展形状をシミュレートした。
- 4) き裂進展形状から貫通形状を保守的に見積り、想定漏洩口がもんじゅのそれに比べはるかに小さいことを示した。
- 5) 評価した漏洩口からのナトリウム漏洩量を評価した。

本研究は構造の分野では最大規模の3次元非弾性解析を含み、この結果をデータベースとして種々の形状のき裂を評価するものである。この中で解析法に関して破壊の分野の著名な研究者の興味を引き、発表後に数値解析手法に関するディスカッションを行った。

7.3 全体的動向と事業団業務への反映

全体的に専門的で高度な発表が多かった。特に英国から発表はしっかりした基礎研究の成果が発表されており参考になる。設計の分野からは距離のある基礎的な研究、言い替れば材料試験の領域内に留まったものがほとんどであるが、ラチェット・高温破壊力学の分野でFBRに焦点をあてた研究がなされており実機への適用をためしてみる価値があると思われる。

同じく英国の研究で注目を集めている延性消耗則によるクリープ疲労寿命予測に関する発表は無かった。

7.4 まとめ

本セミナーは学術的な研究テーマについて、実質的な議論を行うには最適な場であると考えられる。但し設計サイドの話になると参加者の興味をひくことができない。高速炉関連ではフランスが本会議で実機設計に直結した発表を行っているのに対しポストでは英国の基礎研究が目立った。特にラチェットと破壊力学に関しては最も進んだ研究を行っていると思われこの分野では今後とも注目に値する。

表1 DIVISION

COUNTRY	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	TOTAL
ARGENTINA									1		1							2
AUSTRIA							1		1		3							5
BELGIUM	1	2	5	2		1		2	2		1				1			17
BRAZIL	3				1			1	1									6
BULGARIA	2								1								2	5
CANADA		1	2		1		1	1	3	2					2			13
CZECHOSLOVAKIA	1					1							1				2	5
D. R. OF GERMANY														1				1
F. R. OF GERMANY	6	1	3		8	4	3	11	9	4	7	4	2	6			1	69
FINLAND					2	2								1				5
FRANCE	11	3	8	17	6	11	5	1	8	8	1	1		3	3	1	3	90
GREAT BRITAIN	2				3	3	2	3	3	1	2		1					20
GREECE									1									1
INDIA	4	1		4	1	1	2	1	5				1				1	21
IRAN									1									1
IRAQ																		1
ITALY	6	1	2	5	4	7		3	5	4	2	3	1	2			1	46
JAPAN	5	1		12	2	2	11	16	58	5	9	4	1	4	3	2	1	136
KOREA	1					1	1				1			1				5
MEXICO		1					1							1				3
P. R. OF CHINA	7				3	9	1		1	2	3			1	1		2	30
POLAND	1												2	2				5
PORTUGAL							1											1
ROMANIA	1					1			1				1	1				5
SAUDI ARABIA													1					1
SPAIN								1	1									2
SWEDEN						1			1				2				1	4
SWITZERLAND	2		1	1	1	3			3					2	1	1		15
TAIWAN							1		2									3
THE NETHERLANDS						1					1				1		1	4
TURKEY						1												1
USA	9	3	13	6	5	9	10	14	51	5	3	12	26	2	14	20	4	206
USSR			4		3	2				3	1							13
YUGOSLAVIA									1	1								2
TOTAL	62	14	38	47	40	60	40	54	160	35	35	24	39	27	26	24	19	774

表2 高速炉分野のマクロな動向（テーマ・国別論文数）

	日	仏	伊	英	スス	米	印		合計
・設 計		2				1	1		4
・熱・構造	<u>2</u>	<u>5</u>	1						8
・設計基準・評価法	1	2	1						4
炉体耐震	<u>3</u>		1			3	1		8
炉心耐震	1	1	2	1		2			7
座 屈	<u>5</u>	3							8
安 全		<u>5</u>	1		1		1		8
合 計	12	18	6	1	1	6	3		47

表 3

出張予定者	発表論文	内容
今津 彰 (機器構造開発部)	[Division Coordinator] (特別講演も行う可能性あり) Div. E.	Division E (高速炉分野) の Coordinatorとして会議の企画, 運営に参加してきた。会議中はいくつかのセッションの議長を務める等会議の運営に参加する。
	Fatigue Damage Evaluation of Welded Joints under Thermal Stresses at Elevated Temperatures (本会議) Div. E.	最近まとまった溶接継手に関する新しいモデルに基づくユニークな評価法を提案。構造物試験による検証も含む。
	Advancement in Elevated Temperature Structural Design Code for FBR (セミナ1) *	事業団における高速炉高温構造設計基準に関する評価法の最近の進展, 今後の展開方針等について総括的に述べる。
笠原 直人 (構造工学室)	High Temperature Design Methods for Tubesheet Structures with Validation by Thermal Transient Testing (本会議) Div. E.	高速炉の構造設計上しばしばクリティカルとなる I HXやS Gの管板構造について独創的な簡易解析法と設計評価法を提案。貴重な実験データによる検証結果も含む。本会議で招待論文(発表時間, 論文長さとも通常の2倍)とされた。またイエーガー賞の候補でもある(イエーガーはSMiRT会議の創始者)。
	Analytical Crack Growth Evaluation of Plate with Surface Crack (セミナ2) * (笠原は代読)	高速炉の安全性評価上の重要な配管等からの仮想的冷却材漏洩率の評価(最近の破壊力学に関するR&D成果をもとに従来より縮小できることを示したい)についての重要な論文である。 事業団で最近開発した高温き裂進展挙動の定式化(最適パラメータの選択と近年蓄積されたデータ・ベースによる材料定数の決定)と非線形破壊力学解析手法を具体的構造問題(平板, 直管, エルボ)に適用して系統的計算を実施し, 板厚貫通時のき裂長さ, 開口面積, 冷却材漏洩率等を定量的に示した。 世界的に最先端の研究成果である。セミナのCoordinator から旅費一部先方負担で講演招待をうけている(添付レター参照)。

出張予定者	発 表 論 文	内 容
浅山 泰 (材料開発室)	2. 25Cr-1Mo鋼のクリープ疲労損傷の評価に対する有効応力概念の適用 (本会議) Div. L.	大学時代の研究成果 (指導教官である朝田東大教授との共著)
	高速炉構造材料の疲労き裂進展挙動の特性に関する試験研究 (セミナー2) *	事業団より日本溶接協会に委託 (主査: 朝田東大教授) して、クリープ温度域におけるき裂進展方法を世界に先駆けてその標準化を図った。その上で、系統的な材料試験を展開し、J積分をベースとする破壊力学パラメータのクリープ条件下での適用性を明らかにした。世界的に最先端の研究であり、事業団担当者が関連する専門家が集まった場で発表することにより、リーダーシップを発揮することができる。
	SUS304のクリープ疲労破壊におけるJ積分の解析評価方法 (セミナー2) *	(注) 朝田東大教授より左記3編の論文を浅山が発表するよう要請を受けている。

(注) * (セミナー1) Construction Codes and Engineering Mechanics
(セミナー2) Inelastic Analysis, Fracture and Life Prediction

これらの論文はSMIRT で発表 (同時にTransaction にも収録される) した後、この分野での権威ある学術雑誌である。

- Nuclear Engineering and Design か
- Pressure Vessels and Piping

に投稿する予定である。

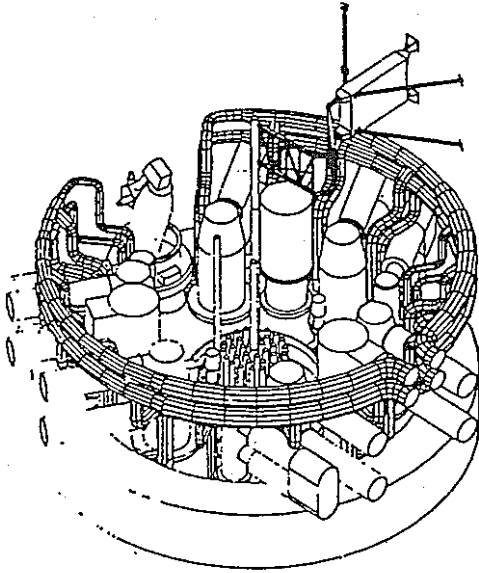


Fig.3 : on roof layout
study

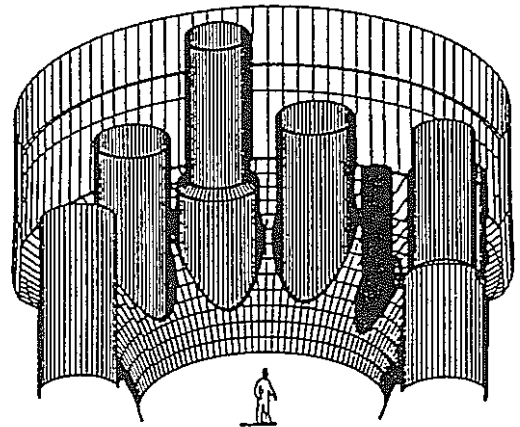


Fig.4 : Inner-vessel
study

図1 EFR構造(3D CAD)

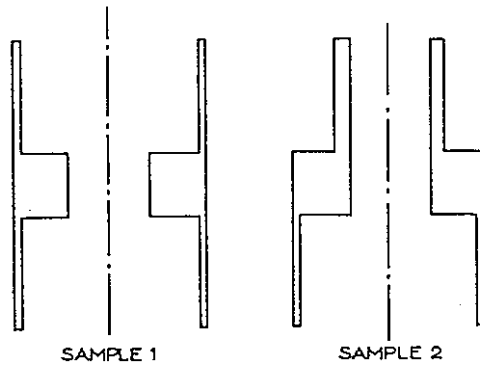


Figure 2

図2 カダラシュ熱過渡強度試験体

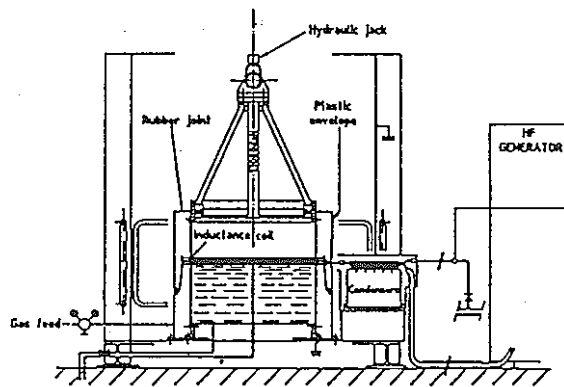


Fig. 1 : Experimental set-up graph

図3 サクレイ座屈試験体

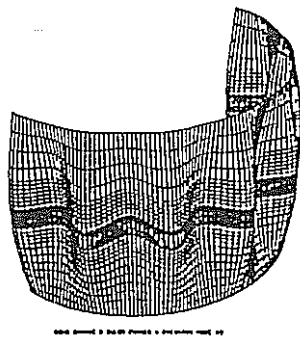


Fig.18 : Computed pressure buckling mode.

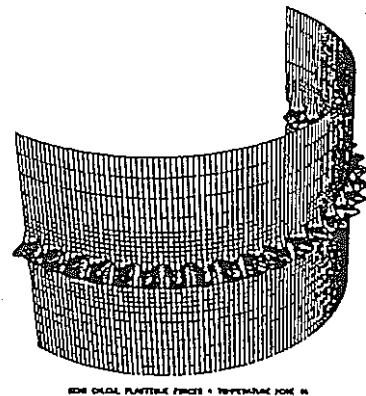


Fig.19 : Computed thermal buckling load

図4 座屈解析結果

II. 各技術分野の動向

1. Division E (Fast Reactor Core and Coolant Circuit Structures)

1.1 概要

- (1) 日仏の貢献がずば抜けていた。日本からは電中研-MIT Iの免震および座屈に関する論文が多かった。動燃が発表した2件の論文は手法としてのオリジナリティが著しく技術をリードしているといえる。仏からはSPX2, EFRの設計に関するもの(特に熱・構造問題), 設計基準, 座屈, 安全の論文が多く発表された。
- (2) EFRの設計の進捗の報告があった。炉体構造の簡素化とコンパクト化を追求するうえで構造健全性面からの成立性評価がポイントとなる。これに対して炉内の熱・流動挙動の正確な把握と設計成立範囲拡大を図るための設計基準の高度化を重視して研究開発が進められている。前者に対しては解析によるほかに大規模水流動試験が今の時点で実施されている。また新装置の建設も計画されている。後者に対しては欧州統一基準としての仏の基準であるRCC-MRの高度化が各国の協力のもとに推進されている。
- (3) 仏はRCC-MRの高度化のためにカダラシュを中心に系統的な熱過渡試験(5基のナトリウムループ)を含めた研究を強力に実施している。高度化のアプローチは日本のものと類似である。また具体的設計問題への適用の検討にも力を注いでいる。
- (4) 仏のサクレイでは主として炉内構造の複合荷重(圧力, 熱応力, 自重)下での種々の座屈に関する研究を応用のきく解析手法の開発に主眼を置きながら着実に進めている。このやり方は規模こそ違いますが, 事業団のアプローチと一致している。これに対して電中研の座屈に関する研究開発は薄肉円筒の地震時剪断座屈の大規模試験を重点的に行っているのが特徴である。

1.2 各論

1.2.1 設計

- (1) Progress in LMFBR Design: The European Fast Reactor Compact Primary System (NOVATOME, NNC, INTERATOM, ANSALDO) E03/1

1988年3月に開始されたEFRの概念設計の進捗について報告している。

- SPX2, SNR2, CDFRに比較して15%のコスト削減を狙っている。
- 主容器の直径は20/21mから17/17.5mとなる。8-IHX, 4-Pumpから6-IHX, 3-Pumpとなる。
- 設計基準は仏のRCC-MRを統一基準として適用する。
- コンパクトになったために炉容器内の熱容量が減少して熱過渡条件が厳しくなるが、解析により成立性を見通しを立てた。
- プール内の熱流動に関しては解析の他に各国の水流動ループを用いて試験を一部実施中である。また新装置の建設の予定もある。
- 主要構造部についてRCC-MRで評価し許容値内に収まっていることを確認している。
- 水平免震を採用、垂直免震は不要としている。
- コンパクト化のため遮蔽の困難が増している。
- SPX1と同じく自立型炉心を採用している。

(2) SUPERPHENIX Fuel Storage Tank Investigations Concerning the Sodium Leak-Dimensional and Material Aspect (NOVATOME) E03/3

- 亀裂の発生原因は高い残留応力の存在下でのhydrogen induced crackingと考えられる。水素の発生源としては、溶接、ドラムの水張り試験、ナトリウムと錆との反応、ナトリウム中の水素不純物等が考えられる。
- 亀裂発生再現性試験が現在進められている。

1.2.2 熱構造解析

(1) High Temperature Design Methods for Tubesheet Structures with Validation by Thermal Transient Testing (PNC) E01/1

- 高速炉の構造設計上しばしばクリティカルとなるIHXやSGの管板構造について独創的な簡易解析法と設計評価法を提案
- 貴重な実験データによる検証結果もふくむ
- 招待論文とされ、発表時間、論文長さとも通常の2倍が与えられた

(2) Creep Fatigue Damage of Large Shells Submitted to Thermal Gradients due to Sodium Level Variations (NOVATOME) E01/2

- SPX2のシングル・レダンの上部のナトリウム液面近傍部のクリープ疲労

評価を実施

- ・ 弾性解析では昇温時間を遅くしても応力はさ程減少しない。RCC-MRによると許容値を超える。
- ・ 非弾性解析を実施。最大応力が発生するのは急速な出力上昇が終了した時点。高温で温度が安定する間の応力減少は大きい。出力低下に伴う温度降下時の応力はさ程大きくはない。
- ・ 非弾性解析は2直線移動硬化モデルの他にChabocheモデルも使った。ラチェットがいくらか認められたが、定量的な議論は出来ない。クリープ損傷値が著しく小さくなったが、これは主として昇温後の温度の安定過程の除荷の影響である。

(3) Experimental Study on Ratcheting of Cylinder Subjected to Axially Moving Temperature Distribution (MHI, MAPI) E01/3

- ・ 薄肉円筒試験体に高周波加熱と水冷により軸方向温度勾配を与え、ラチェット試験を実施。hot front cycling, cold front cyclingおよび温度の移動なしについて行った。
- ・ 別途述べられている予測式 (SMIRT-10 Div.L) と比較。
- ・ 温度の移動がない時は有為なラチェットは生じない。温度移動距離が小さい時はラチェット量は小さい。
- ・ 温度の移動距離が小さい時は予測式は大体合う。予測式はステップ温度変化と線型温度変化の場合について与えられているが、実験条件がどちらに対応するかは微妙。

(4) Thermal Shock Experiments and Inelastic Calculations in Piping Systems (CEA-Cadarache, EdF) E01/4

- ・ VICTUSによる第3ステップの試験。3次元配管モデルを用い、熱変形拘束(塑性域)、コールドショック(8サイクル)、580度での21日間のリラクゼーション試験を実施。試験後室温で残留変形(端点変位、エルボの面内、面外オーバリゼーション)を測定。ラチェットとリラクゼーション中に弾性追従による変形が生じた。
- ・ 試験に対応した条件でCASTEM TEDELによる簡易非弾性解析を実施。実験とは合っていない。

(5) SUPER PHENIX Reactor Block Thermalhydraulic Behaviour Comparison
Between Calculations and Experimental Results (NOVATOMB)E01/6

- ・ ルーフスラブのIHX やポンプが挿入されるアニュラー空間でのアルゴンガスの自然対流による温度分布(円周方向)を解析した。ポンプでは円周方向温度差が250度もつく。実機の温度を詳細に計測した。測定値は予想下限値に近かった。
- ・ ホットプレナムの定常および非定常熱流動を解析し、実機での測定結果と比較したところ、トラティフィケーションの生成挙動を含めて予測性が良いことが分かった。

(6) A Simplified Elastoplastic Method for the Calculation of LMFR Pipework
Submitted to Monotonous Loadings (CEA-Cadarache, ENSMA)E01/8

- ・ ovalization と板厚方向温度勾配を考慮したはりモデルに基づく解析法を開発
- ・ VICTUSを用いた試験結果、より詳細な解析結果と比較(熱過渡後の残留変形)したところ、それぞれで差が大きかった。

1.2.3 炉体耐震

(1) On Problems to be Solved for Utilizing Shock Isolation System to NPP
(東大, 電中研)E03/1

- ・ タンク型FBRについてMITIからの受託で電中研が実施している研究開発の概要について報告

(2) Comparison of Seismic Isolation Concepts for FBR (電中研, 東大他)E03/2

- ・ 上記の研究開発の中でいくつかの免震概念の比較を行った。

(3) Some Remarks on Fast Breeder Reactor Block Antiseismic Design and Verification (ENEA)E03/5

- ・ 1987年IAEAの'Fast Breeder Reactor-Block Antiseismic Design and Verification'に関する専門家会議の概要を述べたもの。

1.2.4 炉心耐震

6件の論文が発表されている。その内のいくつかは実験結果も含む。

1.2.5 設計評価法

(1) Fatigue Damage Evaluation of Welded Joints under Thermal Stresses at Elevated Temperatures (動燃) E05/1

- ・ 従来本格的な形では提案されたことのなかった溶接継手の疲労評価法を新しく提案
- ・ 溶金の疲労強度は母材と同等である。それにもかかわらず疲労試験で溶金部で壊れるのは、繰返し荷重下では溶金の方が柔らかくなり溶金部でひずみ集中が生じるためというのが基本的考え方である。
- ・ 構造要素の熱疲労試験結果から溶金の等価降伏応力を定め、それを用いて原子炉容器の液面近傍の熱応力に対して簡易非弾性解析を実施し、継手のひずみ集中係数等を決めた。

(2) Assessment of the Creep-Fatigue Damage by the Elastic Route of the RCC-MR Some Lessons Drawn from in Sodium Test(CEA-Cadarache) E05/2

- ・ 1985年版をその後の研究開発成果によってどのように改訂したか(1987年版)を述べる。
- ・ クリープ疲労評価法を改良するためカドラッシュにEVASION, THERMINA, MARINA, といった装置を設置して試験と関連解析を実施した。
- ・ 主に検討したのは一次応力の膜と曲げの区別, 二次応力における弾性追従の効果, 一次と二次応力の重畳効果, クリープに及ぼす多軸応力の効果である。
- ・ これら进行评估するために系統的試験と解析を実施し, 新しい評価法を提案。

(3) Creep Fatigue Analyses of a Single Wall Redan According to the RCC-MR (NOVATOME, NNC) E05/3

- ・ SPX-2 の一重レダンのクリープ疲労評価を弾性解析と非弾性解析に基づいて行った。
- ・ 3次元構造であるため全体構造に対して3次元解析を実施し, 従来のRCC-MRを適用すると許容値を満足しなかった。
- ・ 局所的な形状を表現できる2次元解析を実施し寸法, 形状を最適化するとともに, 1987版のRCC-MRを適用すると制限値を満足した。
- ・ 3次元非弾性解析を実施し弾性解析による評価と比較した。後者は適度に保守的であることが分かった。

1.2.6 座 屈

- (1) 電中研がメーカーと実施した研究 (M I T I からの受託を含む) を 5 編の論文として発表した。
- (2) 仏からは熱応力との重畳や境界条件の影響等理論的面に重点を置いた論文が 3 編発表された。

1.2.7 安 全

- (1) C D A や Containment を中心とする 8 編の論文が発表された。

2. Division F (LWR Pressure Components)

2.1 概 要

主として軽水炉を対象とした Division F であるが、発表の内容は、その観点、方法ともバラエティに富んでおり、興味深い。材料試験片レベルのものから構造物試験レベルのものまで様々だが、手法としては破壊力学によるアプローチをとったものが多い。破壊力学の実機への適用という点では、高速炉よりも軽水炉の分野の方が進んでいるようである。

2.2 各 論

(1) Crack-Arrest Toughness Determination from Stub-Panel Specimen Tests

(ORNL, USA)

ORNL で行われたき裂の進展・停留挙動 (crack run-arrest behavior) 試験およびその解析に関する報告である。

- ・ 対象は A 533 grade B class 1 鋼である。温度条件はアイソサーマルである。
- ・ F E M を用いて、動的破壊じん性の値を、試験データから決定した。
- ・ P T S の下では、き裂の進展挙動はすべての段階について予測されなければならない。この報告ではき裂停留に焦点をあて、 K_{Ic} (き裂停留破壊じん性)、 K_{ID} (動的破壊じん性) を求めた。

(2) Strain Rate Dependent Environmental Cracking of Ferritic Steels in High Temperature Water (UKAEA, UK)

- ・ 高温水中における腐食挙動に関する研究である。
- ・ 環境割れ (environmental cracking) はき裂先端に硫黄に富んだ雰囲気形成されることにより生じる。

- 硫黄の含有量の少ない鋼を用いることにより環境割れの発生を抑制することができる。
- 酸化物も環境割れの発生に寄与する。全体の環境が硫黄によって汚染されることによっても同様の結果となる。
- き裂先端のひずみ速度がある臨界値を越えた場合にのみ環境割れが生じる。
- 応力腐食、腐食疲労の両方を評価しうる方法を考案した。
- 実プラントの破損を簡単に検討した結果、本研究の結果と矛盾がないことが分かった。プラントの破壊は異常条件で生じている。異常状態とは、き裂先端のひずみ速度が臨界値以上になるばかりでなく、化学的環境も異常であったと思われる。

3. 破壊力学 (D i v. G)

3.1 概 要

破壊力学分野の発表は大きく破壊力学パラメータの数値解析法に関するもの、軽水炉の分野で、L B Bの立証やP T S問題を対象とした構造要素試験、解析に関するもの、および基礎的な材料試験に関するものに分かれる。

高温破壊力学の分野に関しては発表の数も少なく、アクティビティはあまり感じられなかった。

3.2 各 論

(1) The Theta Method Applied to the Analysis of 3D Elastic-Plastic Cracked Bodies (EDF)

フランスの弾塑性き裂の簡易解析法に関する発表。

原理は仮想き裂進展法の拡張である。

フランスは本方法の適用に関する発表を他にも数編行っている。

(2) Crack Initiation and Crack Propagation of an Elbow Under In-Plane Bending in High Temperature Water of Elevated Oxygen Content (MPA)

実機サイズの軽水炉給水配管のき裂の発生と進展を対象とした試験研究。

材料は炭素鋼である。

主な試験条件は曲げ荷重, 240℃, 腐食雰囲気となっている。

(3) Application of Laplace Transform to Industrial Problems: Determination of

Crack Initiation and Usage Factor

熱過渡時の構造物中のき裂の応力拡大係数を簡易に計算する手法。

S Y S T U S コードに含まれている。

(4) Creep Crack Growth Verification Testing in Tubular Components (CEC)

軸方向表面き裂付き薄肉円筒 (Alloy 800H) の内圧によるクリープき裂進展を測定。

計装 電気ポテンシャル

解析 C E G B の reference stress による簡易法で C^* を計算

表面き裂だが 2 次元解析

インキュベーションタイムに関する質問あり

(5) Application of the Leak Before Break Concept to Steam Generator Tubes

(FRAMATOM)

蒸気発生器伝熱管に生じたき裂の事故時の安定性に関する試験研究。

荷重は内圧, 熱荷重, およびその他外力である

1 0 0 0 ケースのバースト試験を実施

材料はインコネル 6 0 0, 6 9 0 である。

3.3 まとめ

クリープき裂進展を扱ったもので実際にプレゼンテーションされたものは(4)だけであるが, 表面き裂で行った実験を最深部だけで 2 次元の評価を行っていること, 解析比較しているき裂進展速度の領域が狭いことなど, 技術的なレベルは低く, クリープき裂進展が支配的となる高速炉の評価に直接反映できる情報は得られなかった。

4. Division L (Inelastic Behavior of Metals and Constitutive Laws of Materials)

4.1 概要

Division L は材料の非弾性挙動および構成則に関して主として材料試験レベルの観点から論ずる Division である。クリープ疲労の評価等が中心テーマとなる。おもな発表国は日本、フランス、イギリス等である。本年は試験、解析条件の高度化が進み, おなじくクリープ疲労試験にしても従来のように単軸試験が主流ではなく, 多軸試験が主流となる等の高度化が進んでいる。

4.2 各論

(1) Validation of a New Multiaxial Criteria for Creep-Fatigue DamageEvaluation (CEA-CEN Cadarache, France)

RCC-MRに1987年に導入された多軸クリープ疲労クライテリアについて報告している。

- ・ N47あるいは以前のRCCMRに採用されているVon Misesのクライテリアは、多軸状態では過度に保守的であるとの知見から出発している。
- ・ いくつかの多軸クライテリアをレビューしている。(ORNLモデル, 'Ecole des Mines de Paris'モデル, エネルギークライテリア)
- ・ そのうえで新たなモデルを提案している。このモデルはVon Misesのクライテリアは剪断変形或いは剪断エネルギーしか考慮しないのに対し、応力の静水圧成分をも考慮する点の特徴である。
- ・ これは、クリープ状態におけるキャビティの成長、収縮には応力の静水圧成分も寄与するであろうとの考えに基づいている。
- ・ 新たなモデルを含む4モデルを試験データと比較している。試験データは単軸の引張/圧縮ひずみ保持波(316 SPH Steel, SQ plate, at 600 °C)である。
- ・ この結果、Von Misesのクライテリアは引張保持に対しても圧縮保持に対しても同じクリープ損傷を与え、試験結果と一致しないが、他の3モデルは圧縮保持に対してはクリープ損傷支配型の予測を与え、試験結果と合うとしている。
- ・ 即ち、Von Misesのクライテリア以外のクライテリアの特徴は、引張負荷下と圧縮負荷下におけるクリープ損傷の非対称性を表現しうることにある。
- ・ 現在、圧縮2軸応力下におけるクリープ疲労試験(MARINA TESTS)を実施中で、これが終了すれば、さらに検証データが得られることになる。

(2) Effect of Compressive Stress Field During Dwell Time in Creep FatigueEvaluation (CEA-CEN, Saclay, France)

クリープ疲労損傷における多軸応力状態の効果を報告したものである。

- ・ クリープ損傷が応力状態に依存することはよく知られている。多軸応力下では最大剪断応力以外に最大主応力にも依存するとの指摘がなされている。
- ・ 現在提唱されているクライテリアは、力学的、現象論的、金属学的の3種に分類できるとし、10種のクライテリアをレビューしている。
- ・ これらのクライテリアによる予測と実験結果を比較し、一つ強調すべきこととして、Von Misesのクライテリアは2軸の引張下では必ずしも保守的な予測を与

えないことを上げている。

- 本節(1)で示した論文のクリープ疲労試験および4種のクライテリアによる評価結果を引用している。
- ひずみ保持曲げ試験（1本の試験片で同時に引張保持試験と圧縮保持試験を行える）を行い、き裂の発生回数は引張保持試験と圧縮保持試験で差が無かったとしている。
- 試験片の観察により、引張保持側では粒界破壊が見られたのに対し、圧縮保持側では粒内破壊であったとしている。
- 設計にあたってはひずみの保持位置に十分な注意を払う必要があるとしている。

(3) Creep-Fatigue Interaction on Thermina Samples Experimental and Numerical Results (CEA-CEN, Cadarache, France)

Thermina試験のプロクラム、結果及び結果の評価に関する報告である。Thermina試験とは、CEAで行われている構造物を対象としたクリープ疲労試験である。これに関しては、Division Eでも報告されている。

- Thermina試験の特徴は、1次定荷重作用下で繰り返し荷重が重畳する場合のクリープ疲労試験を行うことにある。
- 1次荷重は機械荷重による軸力であり、2次荷重はナトリウムによる繰り返し荷重（コールドショック）であり、高温で保持される。
- 試験片は形状の異なる2種（一つは膜応力を模擬、他は曲げ応力を模擬）を用いた。
- 高温温度、低温温度、一次応力、保持時間をパラメータとして5条件の試験を行った。
- SEM等による破面解析を実施中である。全ての試験片において、内部（熱過渡面）には粒界型のき裂が観察された。
- クリープには多軸応力の影響があるとしているが、詳細は不明である。
- 試験結果の解釈のため、熱解析を含む応力解析を行った。応力解析は弾性解析及びRCCMRで1987年に採用された新たな基準によって行われた。後者のほうが試験結果との一致は良好である。
- さらに、Lemaitre, Chabocheらの方法（クリープと疲労の相互作用を考慮することにより、損傷の累積の加速を表現）でも評価した。結果はRCCMRの方法より若干保守的である。
- 非弾性解析も行った。①線型移動硬化則および②Chabocheモデルを用いた弾塑

性解析と、③移動硬化則を用いた粘塑性クリープ解析を行った。

- 線型移動硬化則を用いると、ひずみ保持がピークで生じない場合（特に1次応力と反対の符号で生じる場合で一次応力が小さい場合）は、保持応力を小さく見積もるため、危険側の評価となる。ひずみ保持がピークで生じる場合は逆に過度に保守的な評価となりがちである。
- 今後、さらに破面解析を充実させ、定量化をはかり、各評価モデルを判断する場合の資料とする予定である。

(4) Defect Assessment Procedures at High Temperature (CEGB, United Kingdom)

R5 (CEGBの作成した高温構造の解析評価手法)のうち、欠陥を含む構造の応答に関する部分を取り上げたものである。この方法の特徴は、クリープき裂あるいはクリープ疲労き裂を表現するパラメータとして C^* を用いること、さらにこの際、参照応力法を用いた簡易解析法を採用していることである。

- 参照応力法の大きな特徴の一つは、(材料試験データに基づく)現実的なクリープ特性(クリープひずみ特性およびクリープ破断特性)を用いることができる点であり、これによりノートン則等による解析よりも正確な結果が得られる。
- 熱過渡負荷のように、表面におけるひずみ範囲と、内部におけるひずみ範囲が異なる場合には、き裂進展の評価に注意が必要である。
- クリープ疲労き裂評価の際、疲労損傷は通常の設定(ただしき裂の進展を考慮して分母の寿命を所定のき裂長さに至るまでの繰り返し数と定義)とし、クリープ損傷は延性損耗の概念により定義している。これによりほぼ保守的な評価が可能であるとしている。
- き裂進展において、疲労による進展は有効応力集中係数の関数として、クリープによる進展は C^* の関数として表され、全進展はこれらの和として表される。 C^* の適用性については荷重制御でも変位制御でも差はない。これらの計算は、リガメントが脆性破壊する前にやめなければならない。
- 参照応力法の説明がなされている。従来クリープき裂に対する参照応力法は定常クリープのみ扱ったが、遷移クリープにまで拡張することは可能である。また、この方法によると、 C^* (定常負荷及び繰り返し負荷に対応)を簡易的に求めることが出来る。
- ひずみ制御の繰り返し負荷においては厳密には応力緩和を(に伴うひずみ速度の低下)を考慮しなければならない。これには実際の繰り返し飽和時の応力緩和のデータを用いることを推薦する。

- ・ 荷重低下が生じた場合のクリープき裂進展の簡易評価法も提案している。
- ・ 要するに、一定荷重下のクリープき裂進展、繰り返し負荷下のクリープ疲労き裂進展に対して適用可能な参照応力法に基づく評価法を開発し、その有効性を試験データによって確認したとしている。

(5) Deformation and Failure of Type 304 Stainless Steel Under Biaxial Cyclic Loading at Elevated Temperatures (CRIEPI, Japan)

304の多軸（軸力-ねじり）疲労特性及び非弾性挙動に関して報告している。クリープ疲労は含まれていない。

- ・ 比例および非比例負荷下における多軸疲労寿命を Γ -Planeモデルに基づいて整理し、良好な結果が得られたとしている。
- ・ いわゆる2曲面モデルに新たなパラメータである非比例性を表現するパラメータを導入することにより、非比例負荷下で顕著となる繰り返し硬化を含めて、多軸の変形挙動をよく表現できるとしている。実際良くあっているようだ。

5. その他

5.1 概要

Div. Dの運転経験に関するセッションの中でPWR蒸気発生器の破損調査等に関する発表があり非常に活発な議論が行われていた。大洗で計画中の2重管蒸気発生器のR&D実施に際して参考になると考えられる。

またDiv. Mの構造信頼性のセッションにおいて確率論的破壊力学に関する発表が行われていた。確率の計算手法に関するものが主で、中心となる破壊力学パラメータの計算法に関しては特に目新しいものはなかった。Div. Mに関しては建築、土木分野の発表多く（前週に行われたICOSAR出席者が多い。）、設計への適用等、機器設計に比べかなり積極的な展開をはかっているようであった。

5.2 各論

(1) Remedies for PWR Recirculating Steam Generator Tube Failures

(Idaho National Engineering Laboratory)

SG伝熱管破損要因のランク付が以下のようなにされた。

RANK 1 ロール拡管遷移領域でSCC

UバンドでのSCC

RANK 2 管-管板継手のクレビス領域のIGSCC（アルカリ腐食）

RANK 3 スラッジやスケールの堆積による孔食

対策として次のものが紹介された。

ショットピーニングによる遷移領域の応力緩和

温度の低下

部分拡管→完全拡管

アルカリ環境の除去

(2) A Predictive Model for Steam Generator Degradation Through PW SCC

(LABORELEC Belgium)

SG伝熱管のロール拡管部の遷移領域で発生しやすいSCCの予測法に関するものである。（材料 Inconel 600）

き裂が長くなると進展がしにくくなることに着目して γ 関数（横軸 き裂長さ 縦軸 頻度）による予測モデルを作成、プラグ計画に用いる。

モデルは物理的な意味あいは小さくフィールドデータをフィッティングして作成したものである。

(3) Comparison of Approximative Markov And Monte Carlo Simulation Methods

(University of the Federal Armed Forces, FRG)

軽水炉配管を対象とした確率論的破壊力学手法に関する研究。

モンテカルロシミュレーションとマルコフ過程理論による評価結果を比較している。

2次元の疲労き裂進展問題として扱っている。

(4) Assessment of High Temperature Reliability with Probabilistic Fracture Mechanics Methods (KfK)

確率論的研究の中では材料のクリープが問題となる高温の問題を取り扱った唯一の研究である。

簡易確率計算 (First Order Reliability Method) を行っている。

破壊力学パラメータ計算にはAinsworthらの提唱したCEGB法を使用している。

5.3 まとめ

蒸気発生器に関しては現実的には相当数の破損例があるようである。高信頼性蒸気発生器の開発には、破損例とその対策に関してさらに調査が必要と考えられる。

確率的な考え方をいれた高信頼性設計法は建築、土木分野において盛んであり、こういった分野の動向把握も必要となる可能性がある。

6. Seminar on Construction Codes and Engineering Mechanics (Seminar 15)

6.1 概要

ASME, PVRC, RCC-MR基準, 日本的高速炉基準, 高温ガス炉基準に関する最新の動向とそれらの基盤となる構造工学, 材料工学等の研究開発成果の情報交換と意見交換を行った。日, 米, 仏, 西独, 伊, 中国等から22編の論文発表があった。

6.2 各論

(1) 1A 'An ASME/PVRC Project on Review of ASME Nuclear Codes and Standards'
(PVRC)

ASMEから依頼を受けてPVRCがASMEの原子力関係の規格・基準の全般的レビューをすることになった。そのねらいはこの分野の知見や得た教訓を後世代に伝えておくことである。その背景には米国内での事実上の原子力発電所建設のモラトリアムのため新世代が極めて少なくなっており、技術の継承をこういう形で行

わなければならないという深刻な事実がある。本作業の背景や進め方が述べられている。

(2) 1 D 'Codes and Standards for LMFBR-Structures - Status and Development in Europe (IA, Ansaldo, Novatome, NNC)

- EFRの設計、建設に用いられる基準は'Design and Construction Rules Committee (DCRC)と言われる合同 W/Gが責任をもつ。R&D側はそれをサポートする。
- その設計基準の母体は仏のRCC-MRである。
- これまでの作業で得られた主要な結論は以下のとおり。
 - 1) Negligible creep curve : RCC-MRのそれより制限が緩和された曲線を設定
 - 2) Effects of Irradiation : 短時間強度に対しては1 dpa以上で照射の影響を考慮する。クリープ破断については500℃以上でHe濃度(appm)を指標にして強度減少を考える。
 - 3) Effects of Sodium : 316L(N)で2mm以上の板厚で通常の純度管理下では考慮しなくてもよい。
 - 4) Design Stresses : 各国で設定の仕方が違う。当面RCC-MRに合わせた。
 - 5) Fatigue and Creep-Fatigue : ストライピングの評価ようにひずみ制御で 10^9 サイクルまでの疲労線図を、また流力振動等の評価用に応力制御で 10^8 サイクルまでの疲労線図を用意した。クリープ疲労評価法は当面1987年版RCC-MRに準拠することにした。
 - 6) Design of Weldments : 現在模索中(データがいる)。クリープ損傷についてはRCC-MRのJr係数を短時間、低温側に拡張中。
 - 7) 316L SPHとMod. 9Cr1MoVnbの物性値の整備

(3) 2 A 'Advancement in Elevated Temperature Structural Design Code for FBR (PNC)

(4) 2 D 'The Interpretation of Some Long Term Creep/Fatigue Test Results in Relation to Design Code Rules (英, Risley)

- UKの提案するクリープ疲労評価法(クリープ損傷はクリープ延性損耗で、また疲労損傷は亀裂の進展ベースで評価する)を述べる。
- 英国では最長4年(24時間保持)のクリープ疲労試験データを持っており、上記評価保やN-47, RCC-MRの方法の評価を行った。いずれも保守的評

価結果を与えるが、UKの方法は安全裕度の根拠が明快と主張。

- ・ その他圧縮保持のクリープ疲労試験や複雑な疲労試験による本評価法の検証も行っている。
- ・ CEAのRocheからは本方法への批判が出され、欧州内でもまだコンセンサスが得られていないことが露呈された。

(5) 2 E 'Creative Design-By-Analysis Solution Applied to Elevated Temperature Components (米, GE)

- ・ FFTFとCRBRの設計評価への非弾性解析の適用を紹介。評価の保守性を確保するためのロジックの詰めが希薄。

(6) 2 F 'Recent Design Developments in the RCC-MR Code for Components Operating at Elevated Temperature' (仏, EDF, CEA, Novatome)

- ・ RCC-MRの1987年版の旧版からの変更とその根拠を述べる。

(7) 3 D 'ASME Code Program to develop Improved Fatigue Design Criteria (米, O'Donnell)

- ・ フェライト鋼用の高サイクル疲労線図を作成
- ・ 残存寿命評価のため時効と環境(水)効果を考慮した評価法(破壊力学手法)を提案
- ・ 溶接継手の疲労評価法を提案

(8) 3 F 'Creep Fatigue Damage Assessment (米)

- ・ 従来の文献のレビュー

7. セミナー5 (非弾性解析, 破壊と寿命予測)

7.1 概要

非弾性(構成則)関係が目立った。次いで破壊関係が多かった。いずれも実機への適用段階には達しておらず、また構造物試験で検証した例もほとんどなく、概念的なレベル、あるいは研究室的なレベルの発表が多かった(そうでないものもある。たとえばPNC)。著名な専門家が多かった事もあり、すでに過去に提案されたオリジナルモデルをより一般的な条件下へ適用するための拡張に関する提案が目についた。それだけに議論は活発であり、レベルも高かった。ただし、意外なことに長

時間側への評価法の外挿に関する発表は皆無であり、外挿は危険だ、我々に出来るのは内挿だけだ、といった論調が目立った。

7.2 各論

(1) Viscoplastic Stress Analysis Models (E. Krempl, Rensselaer Polytechnical Institute, USA)

<プレプリントはなし>

有名なKremplモデルの多軸への拡張に関する報告。ただし室温に限られる。

- 焦点は多軸（Kremplが参照したのは軸力とねじりの2軸状態）の非比例負荷における「Additional Hardening」。Kremplのこの度の拡張によると、これは定性的にも定量的にも合理的に説明が出来る。
- 単軸状態の場合よりかなり関数（あるいはパラメータ）が増えているようであった。
- 高温状態への拡張がほとんど進展していないのがやや気になった。
- 実際に作業を行ったのは韓国の学生である。

(2) Mechanistic Considerations for TMF Life Prediction of Nickel-Base Superalloys (D. L. McDowell et al, Georgia Institute of Technology)

環境効果という視点から各種のクリープ疲労評価法をレビューしたもの。既存の評価法はほとんどが環境効果を陽に含まない点に特に注目している。

- 高温での使用性という点から、ニッケル基合金に着目している。対象はガスタービン、ジェットエンジン等としている。
- この材料の時間依存特性は環境効果即ち粒界あるいはすべり帯の酸化による。
- 延性材料（304等）のクリープ疲労評価法がそのままニッケル基合金に拡張できるとは限らないことに注意しなければならない。（平均応力効果がより顕著になる。）また、環境効果が時間依存性の挙動に及ぼす効果もより大きくなる。
- 既存の評価法を次の4種に分類している。
 - * 損傷パラメータによる方法
 - * （修正を施した）応力・ひずみに基づく方法
 - * 酸化の効果を陽に含む、力学的なアプローチ
(Pedron et al, Antolovich et al, Jayaraman, 他)
 - * 損傷速度によるアプローチ
- 結論として、酸化の効果を陽に含む、力学的なアプローチが最も有望である。

なぜならば他の方法はメカニズム的な根拠が不十分だからとしている。また、熱疲労のように、等温条件以外で生じる損傷については、非等温性の影響を十分考慮する必要があるとしている。（酸化の効果が温度により異なるという意味か。）

(3) Lifetime Prediction of Structures in Anisothermal Viscoplasticity
Coupled to Damage (J. Lemaitre, et al, Universite Paris 6, France)

非弾性モデル（構成則）をFEMコードに組み込んで構造解析（損傷解析）を行った結果の報告。モデルは「State Kinetic Coupling Theory」とよばれる。

- このモデルの特徴は解析過程で損傷が逐次進行することである。つまり、構成則の中に損傷の項が組み込まれている（著者の言葉ではCouplingされている）。
- このモデルは内部状態変数理論に基づくものである。
- 対象とする概念は熱弾性、（粘）塑性、損傷、微視的变化、時効及びそれらの相互作用である。
- FEMによる計算結果を例示している。
- FEM計算の手続きは①初期状態を計算する、②「損傷等価応力」を検討することにより、最大負荷点を決定する、③最大負荷点における破壊までの繰り返し数あるいは時間を計算する、の3プロセスからなる。
- 「Coupling」なる概念が頻繁に出てくるが、これは要するに相互作用と等価な概念であると思われる。

8. まとめ

会議とセミナーに出席し、その運営に参加するとともに、大洗工学センター機器構造開発部の最新の研究開発成果を発表して評価を受け、今後の研究開発の方向づけ、レベルの向上に有効に反映することができた。また、会議の聴講および関係者との議論により関連技術分野の動向を把握し、今後の研究開発に反映する基盤を得た。

得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 事業団の研究開発成果の先導性を再確認するとともに、そのレベルの高さを海外に印象付けることができた。
- (2) しかし研究開発規模の割りには仏等に比べると発表論文数は少なく影響力と言う面では相当差が認められた。

- (3) 高速炉の研究開発では、日仏が質量とも圧倒的にリードしている。米国では新しい体系的活動は認められず、過去の成果の見直しが主流といえる。
- (4) 仏のFBR用の設計基準であるRCC-MRはEFR設計のための欧州統一基準となる。この基準は「もんじゅ」の基準より遅く策定されたが、多数の関連論文を機会あるごとに発表することと、定期的に改定版を発行することにより今やASME N-47と並び世界的に参照される基準の位置づけを得ている。事業団としてはPR方法を更に効果的にするとともに、日本全体で研究開発成果をより体系的に基準に集大成することに一層努力する必要がある。
- (5) RCC-MRの高度化はEFRの設計合理化の要の最重要研究開発分野として、英・独・仏で協力して進められているが、体系化という作業ではCEAを中心とする仏がイニシアティブを取っている。サクレイの理論的研究とカダラシュの系統的熱過渡試験と基準化のための実務的作業は事業団のアプローチとも一致しており、今後緊密に情報交換、意見交換を図ることは有効である。
- (6) 欧州内では英仏のように異なるアプローチを競合させて進めている。今の時点では相互刺激と基本的な見落としを避けるという意味では有効と考えられる。
- (7) 本会議はそれぞれの研究開発の最新成果を提供し合うという意味で良い機会であった。これを通じて日欧間の構造・材料分野の協力は、両者のスケジュール、目標、アプローチ、実績に共通面が多いこともあり有効であるという印象を更に深めた。
- (8) 軽水炉も含めた設計基準分野の動向としては高速炉分野がもっとも活発であり、日欧（とくに仏）が支えている。

軽水炉ではASMEで若干の動きがあるが、WRC (Welding Research Council) のPVRC (Pressure Vessel Research Committee) でのレビュー活動に見られるように、実プラントからのニーズが少ないため、その方面の新しい人材が補充されないため、現在の基準のバックグラウンド資料を後世に伝える作業を行わざるを得ないという苦しい状況にある。

若い研究員が初めての国際会議として参加したが、会議中および後に積極的に情報交換と意見交換を行うことにより自信と刺激を受け、今後の成長に貴重な跳躍台になった。

付録1 ロックウェルインターナショナル W.Veljovich 氏とのミーティング

日 時 8月17日 8:30～16:30

場 所 ヒルトンホテル 会議室

参加者 米国側 W.Veljovich, Robert L.Eichelberger

日本側 笠原, 吉江, 小木曾 (KHI)

以下の(1)～(4)のアジェンダを事前に交換しており, 日本側, 米国側ともに用意した資料をもとに以下のような議論を行った。

(1) 構造物試験

航空機の場合は時間スケールがないのでFBRより簡単である。FBRは加速条件が問題となる。

データのバラツキの取扱いに米国では ORNL Dr. Booker の LOT CENTERED ANALYSIS という方法を用いている。

構造物試験を数体やってもバラツキを考慮すると不十分と考える。発生した多数の亀裂をデータとして取り扱うアイディアは許容できる。

(2) 隅肉溶接評価法

米国では破壊力学は設計には許容されていない。

寿命延命とISIに使用されている。

航空産業では設計段階で使用されている。

FBRでは隅肉溶接は許容されない。

PWRはシール溶接として使用されている。

解析ではまだ取り扱うことはできない。

対策

爆着, 2重管であることを利用して小リークで直す。

N-47

最新版はN-47-28

日本で現在入手できるのはN-47-23まで（図書室調べ）。

管-管板隅肉溶接はコードでカバーされていない。

隅肉溶接の疲労強度減少係数 -3251、3351、3353

最小値4，上限規定なし

(3) 2重管SG

想定破損モードについて

筆者のランク付け

- 1) 管-管板継手の破損
- 2) 拡管部での管と管板のすべり
- 3) 2重管検出溝での疲労
- 4) 内外管界面でのウェア
- 5) 伝熱管腐食
- 6) 伝熱管サポート部でのフレットィング

Veljovich 氏のランク付け

- 1) 管-管板継手の破損
- 2) 伝熱管サポート部でのフレットィング（経験上）
- 3) 2重管検出溝での疲労
- 4) 内外管面圧低下による熱抵抗の増加
- 5) 伝熱管腐食

想定モードに日米で若干の差異があり，大洗で計画中の2重管蒸気発生器のR&D実施に際しては十分な調査が必要と思われる。

(4) 簡易非弾性解析

Veljovich 氏よりリガメントライクな構造の非弾性歪集中の評価法の提案があった。未発表資料入手

（ピーク塑性歪率）／（ピーク弾性歪率）が 弾性応力集中係数に比例するという整理をおこなっている。

また，

集中部でのクリープ損傷＝

（弾性応力集中係数）×（無限遠方でのクリープ損傷）

という提案を行っている。

筆者からは弾性追従パラメータを用いた評価法の説明を行った。

前回の訪日時には弾性追従パラメータの概念がよくわからなかったらしいが、再度説明し理解してもらった。

付録2 CEA カダラッシュ Ph.Martin 氏とのディスカッション

相手 Ph.Martin

日本側 笠原, 浅山

日時 8月21日 12:00~14:00

場所 UCSB構内

本会議においてPh.Martin氏はRCC-MRのクリープ疲労評価法に関する発表を行っており、本件に関するディスカッションを申し入れた。以下にディスカッションにより分かったことを示す。

(1) RCC-MRのクリープ疲労評価法

HUDELESTONに似た非対称応力クライテリアの使用法について本クライテリアはクリープ損傷評価に用いる。

具体的にはタイムアクションルールの分母である破断時間を計算するときの応力算出に用いる。

初期応力の算出について

弾性解析で応力の符号を予測するのは不可能である。

非対称応力クライテリアは非弾性解析専用の方法である（本会議では弾性解析による評価法に関するペーパーの中に含まれているが、誤解のないように）。非弾性解析でも古典的な移動硬化則による方法は、応力レベルが想定はずみに非常に敏感である。

このためシャポーシェのような非線形硬化モデルが必要となる。

シャポーシェの方法は推進者もいるが、材料定数の設定等難しい面もありRC-MRに入れるほどにはコンセンサスが得られてない。

リラクゼーション

$q = 3$ の削減は一般的には、適用範囲を限定してならば可能性がある。