



# 海外出張報告書

—米国機械学会 (ASME) / 日本機械学会 (JSME) 共催  
1998年圧力容器と配管 (PVP) に関する国際会議—

1998年10月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター



本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ  
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1998

## 海外出張報告書

- 米国機械学会 (ASME) / 日本機械学会 (JSME) 共催 1998 年圧力容器と配管 (PVP) に関する国際会議 -

森下 正樹\*、笠原 直人\*、  
村松 壽晴\*\*、堂崎 浩二\*\*\*

### 要 旨

1998 年 7 月 25 日 - 8 月 1 日にかけて米国・サンディエゴ市において開催された、米国機械学会 (ASME) と日本機械学会 (JSME) が共催する 1998 年圧力容器と配管会議 (Pressure Vessel and Piping Conference; PVP) に参加し、以下の論文発表と討論を行った。

[ もんじゅ温度計の流力振動に関するパネルセッション ]

(1) 2 次系ナトリウム漏えい事故の原因究明及び対策検討として実施した破損温度計の流力振動に関する調査・検討内容の発表と討論

[ 一般セッション ]

(2) 平成 9 年度までの 4 年間の計算科学研究の成果である「超並列計算機による非弾性構成方程式の材料定数自動同定法」と「オブジェクト指向による原子力機器の構造設計法」、最新の計算技術に基づく「流体-構造熱的連成挙動の解析的評価手法」、ならびに「ベローズを含む配管系の解析手法」に関する研究成果についての論文発表

また、日本溶接協会の実証炉高温構造設計基準 (DDS) 委員会の主要メンバーと ASME 高温設計委員会の指導的メンバーとの意見交換会が実施された。

本報は、各論文発表の概要、聴講セッションの概要および高温構造設計基準に関する日米意見交換会の概要について報告するものである。

---

\*: 大洗工学センターシステム技術開発部 構造・材料開発グループ  
\*\*: 大洗工学センターシステム技術開発部 熱流体技術開発グループ  
\*\*\*: 敦賀本部 もんじゅ建設所 改革 Gr

## 海外出張報告

-米国機械学会(ASME)/日本機械学会(JSME)共催1998年圧力容器と配管(PVP)に関する国際会議-

### 目 次

第1章	概 要 .....	1
第2章	パネルセッション～「もんじゅ」事故とその教訓～ .....	3
2.1	全 般 .....	3
2.2	発表内容 .....	3
2.3	主な質疑 .....	4
第3章	論文発表 .....	7
3.1	発表の概要および質疑 .....	7
第4章	高温構造設計基準の現状と今後に関する日米意見交換会 .....	10
第5章	聴講セッション .....	12
第6章	感 想 .....	29
付録 I	PVPプロシーディングスリスト .....	31
II	発表用OHP .....	33



## 第 1 章 概 要

### 1.1 出張目的

米国機械学会 (ASME) と日本機械学会が共催する 1998 年圧力容器と配管会議 (Pressure Vessel and Piping Conference, PVP) に参加し、もんじゅ温度計の流力振動に関するパネルセッションにおいて 2 次系ナトリウム漏えい事故の原因究明及び対策検討として実施した破損温度計の流力振動に関する調査・検討内容の発表と討論を行うとともに、温度計の流力振動防止のための設計方針及び 2 次系温度計の改良設計についての理解獲得に努める。

また、一般セッションでは平成 9 年度までの 4 年間の計算科学研究の成果である「超並列計算機による非弾性構成方程式の材料定数自動同定法」と「オブジェクト指向による原子力機器の構造設計法」、最新の計算技術に基づく「流体-構造熱的連成挙動の解析的評価手法」、ならびに「ベローズを含む配管系の解析手法」に関する研究成果について論文発表を行い、多くの専門家との討論を通じて得られた知見を、機構の当該分野における研究の推進、成果の利用拡大等に反映する。

### 1.2 出張概要

#### (1) 出張者：

森下 正樹 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発グループ  
笠原 直人 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発グループ  
村松 壽晴 大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ  
堂崎 浩二 敦賀本部 もんじゅ建設所 改革 Gr

#### (2) 出張先：

1998 年圧力容器と配管会議 (日米機械学会共催)  
ASME/JSME Joint Pressure Vessel and Piping Conference, PVP98  
(米国・サンディエゴ)

#### (3) 出張日程：

平成 10 年 7 月 25 日 - 8 月 1 日

### 1.3 会議概要

1966年に組織された米国機械学会 (ASME) の圧力容器と配管部門 (Pressure Vessel and piping Division) は、これまで圧力容器と配管に関する最新技術について種々の会議を開催し、産業の振興に大きく貢献してきた。本会議は、ASME 基準を支える基礎・基盤技術は高度な研究成果の公表とその広い活用によって達成される、との認識の下に、海外の学協会とも積極的に協力を進めるための、国際的な技術討論の場として位置づけられている。このような観点により、会議にはその他の会議では包含することのできない極めて広い範囲に亘る最新の R&D 成果が、一堂に会した世界の専門家によって議論される。

今回は、特に日本機械学会との共催 (前回の共催による会議は 1995 年、ハワイ) であり、主催者として、鈴木浩平都立大教授、沢東北大教授が名を連ねておられた。また、プレナリセッションでは、秋山東大教授が耐震工学に関する講演が行われた。日本からの参加者も多く見られた。

会議は、以下の分野に分類されるパラレルセッション方式で運営された。

- (1) 規格基準 CODES AND STANDARDS
- (2) 計算機技術 COMPUTER TECHNOLOGY
- (3) 設計と解析 DESIGN AND ANALYSIS
- (4) 流体-構造連成 FLUID-STRUCTURE INTERACTION
- (5) 高圧力技術 HIGH PRESSURE TECHNOLOGY
- (6) 材料と製造 MATERIALS AND FABRICATION
- (7) 運転, 応用, 及び機器 OPERATION, APPLICATION, AND COMPONENTS
- (8) 耐震工学 SEISMIC ENGINEERING
- (9) 非破壊検査部門 NDE DIVISION
- (10) 材料部門 MATERIALS DIVISION
- (11) 学生論文コンクール STUDENT PAPER COMPETITION



## 第2章 パネルセッション～「もんじゅ」事故とその教訓～ (Monju Accident and Learning from It)

### 2.1 全般

本パネルセッションは、もんじゅ原因究明の科技庁タスクフォースのメンバーである東京理科大・原教授と、流力振動の権威である米国アルゴンヌ国立研究所の Dr. S.S. Chen が共同で企画、動燃に対して協力要請があり、実現したものである。

日時：平成10年7月27日(月) 8:30 - 10:15

出席者：Chair：原教授(理科大), Vice-chair：S.S.Chen (ANL),

Panelist：森下・堂崎(動燃), 小倉(東芝)

聴講者：約50名、半分程度が日本人

### 2.2 発表内容

#### (1) History of Flow-induced Vibration Incident in Monju (森下)

(もんじゅ温度計の流力振動破損の技術的経緯)

二次主冷却系配管に取り付けられた温度計さやが折れたために生じた。温度計さやの破損原因は流力振動による高サイクル疲労であり、また流力振動の種類は良く知られたカルマン渦振動ではなく、対称渦放出によるインライン振動であることが分かった。流力振動解析及び試験、疲労解析並びに破壊力学解析により、温度計さやのこうした破損過程を解明した。また、なぜ1本の温度計さやのみが破損したかについても調査・検討し、その理由がさや内のシースの曲がりに帰着することを明らかにした。「もんじゅ」二次系温度計については、破損原因を踏まえた改良設計を行った。

#### (2) Cause of Flow-induced Vibration of Thermocouple Well (小倉)

(温度計の流力振動の原因)

温度計の破損原因を究明するために、実寸大の温度計さや模型を水流動ループに設置し、一連の流力振動試験を行った。その結果、二次主冷却系の条件において、有意な流力振動が生じることが明らかになった。この振動は、双対渦の放出を伴う抗力方向振動(インライン振動)であり、温度計さやの減衰が小さい場合には、さや先端での変位振幅はさや外径のおよそ10～20%に達する。また、温度計内に挿入

されたシース熱電対の状態によって、この流力振動は顕著な影響を受けることを確認した。試験と並行して、流体構造連成解析を行い、二次主冷却系温度計の条件において、双対渦の放出を伴う抗力方向振動が生じる現象を再現することができた。

### (3) Fatigue Analysis of Thermowell due to Flow-Induced Vibration (森下)

#### (温度計の流力振動による破損の疲労解析)

温度計さやは流力振動がもたらした繰り返し応力による高サイクル疲労によって破断した。破面観察により、典型的な高サイクル疲労による破壊形態が確認された。疲労き裂進展挙動は、温度計のさやの固有振動数の変化を通じて流力振動特性に影響を及ぼす。き裂進展と固有振動数変化を連動させた疲労損傷及び破壊力学解析より、き裂の発生から成長、及び最終的な破壊までの破損過程が明らかになった。流力振動とき裂進展の密接な関係は、流力振動疲労試験により確認された。

### (4) Modification and Design Guide of Thermowell for FBR (堂崎)

#### (温度計の改良と設計方針)

二次ナトリウム漏えい事故の原因となった温度計さやの流力振動の再発防止のため、破損温度計と同型の二次主冷却系及び補助冷却設備の温度計さやは全数交換または撤去する方針である。交換する温度計の改良設計のポイントは配管内への突き出し長さであり、温度計測上の要求と流力振動の防止を両立させるように選定した。温度計測上の要求及び流速条件は全温度計で一律ではなく、これらの条件に応じて3種類の背系概念を使い分けることにした。改良温度計が流力振動に対して健全であることを示すため、温度計の流力振動防止のための設計方針を改訂し、設計評価に用いた。本方針は基本的には ASME Code Sec III Div. I, Appendix N-1300 に倣い、同様の同期振動領域を定めているが、これに加え、流力振動によってさやに生じる応力振幅の評価方法及び健全性の判断基準を具体的に定める等、いくつかの点で新たな評価方法を作成したものである。

## 2.3 主な質疑

Q: 何故、「温度高」の信号が出たのか。温度計内にナトリウムがリークしたらナトリウムの温度は下がるのではないか？

A: ナトリウムがウェル内に流れ込み、熱電対が短絡して高温の信号が出た。

Q: 流力振動の再現実験では変位を直接計測したのか、あるいは加速度を計測して変換したのか？

A: 加速度を計測した。



Q：配管内の流れ自体にポンプ脈動や音響共振など、250 Hz 近傍の励振源はないか

A：ないことを確認している。

Q：2次系温度計の総数は？

A：1ループ当たり16本で、合計48本。

Q：2次系温度計は全て同形状とのことだが、残りの温度計に流力振動の問題はなかったのか？

A：全ての温度計をチェックしたが、損傷はなかった。

Q：破損は1本のみが発生しているが破損温度計は初めから何か欠陥がなかったのか？

A：調査の結果そのようなことはなかったことを確認している。説明の中でも示したように、さや管に挿入する温度計シースの曲りが原因となって1本の温度計のみが破損したと推定した。

Q：同じ設計と使用条件で、何故1本だけが流力振動で破損したのか？

A：破損した温度計ではシースの挿入状態によって減衰特性が変わっており、流力振動応答が大きくなって破損したと推定している。

Q：破損した温度計のシースが曲がっていたことは直接確認したのか？

A：シースの曲がりと減衰特性、流力振動特性、及びシースの摺動痕の間に明確な相関があることを実験で確認した。破損した温度計のシースには、シースが曲がっていて流力振動が大きくなる場合に特徴的に見られるパターンの摺動痕が観察された。

Q：シースの重量はウェルに比べて小さいと思うが、温度計の振動特性に影響するのか？

A：シースは軽いので振動数に対する影響は無視できる。一方、シースが温度計の減衰に大きく影響することは実験で確かめている。

Q：設計方針では温度計の構造減衰をどのように与えているのか？

A：構造減衰は温度計の設計に依存するので、設計方針では特定の値を規定していない。通常、0.2%の値を使うことが多いが、改良設計では念のために0.1%の値を用いて評価している。

Q：改良設計では応力集中係数にどのような値を用いているのか？

A：改良設計では2.5を用いている。

Q：流力振動に対する設計余裕はどの位か？

A：改良設計では無次元流速で20%の余裕を見込んでも成立するので、余裕は十分と考えている。また、応答評価と疲労評価を総合すると、10倍以上の余裕があると考えている。

Q：1次系の温度計に問題はないのか？

A：1次系の温度計は形状が2次系と異なっており、事故後にチェックして問題のないことを確認している。

Q：何故、1次系と2次系とで設計がことなるのか。

A：担当したメーカーが異なり、独自の設計をしたため。

C：その辺りに設計管理面での今回の問題の原因が潜んでいる(原教授)。

Q：改良温度計で、シースが曲がっていないことをどのように保証するのか？

A：改良温度計の評価では、シースが無い場合の低い減衰の値を用いている。

#### 2.4 まとめ

参加者数、発表および質疑の点で、ほぼ所期の目的(原因究明と設計改良に関する理解を得る)は達成できたものと考えられる。原教授、Dr. S.S.Chenからも同様の講評を頂いた。質疑は、同一の設計、使用条件であるにもかかわらず何故1本の温度計だけが破損したか、という点がやはり焦点となったが、シースの挿入状態、減衰、振動応答、摺動痕の間に良好な相関があることを説明、理解を得た。



## 第3章 論文発表

## 3.1 発表の概要および質疑

(1) 進化的アルゴリズムと超並列計算機による非弾性構成方程式の  
材料定数自動同定法 (笠原)**Automated Identification of Material Constants in Inelastic Constitutive Equations  
by Continuous Evolutionary Algorithm and Massively Processors**

(内容) 平成9年までの4年間に実施した計算科学研究の内、機器構造設計評価への応用に関するものである。高速炉の高温運転条件により生じる構造物の弾塑性クリープ挙動を高精度で予測する手法として期待されている非弾性解析法を実用化する上での課題として、材料定数同定の困難さがあげられる。本研究は、生物の進化過程を模擬したアルゴリズムにより、材料定数の自動同定を可能にしたものである。本アルゴリズムは膨大な計算時間を必要とするが、超並列計算機の使用することによりこの問題を解決し、実用化を図った。

(質疑) 実用上の観点から計算時間に関する議論があり、超並列計算機の利用によってこの問題の解決を図ったことを説明し、本手法の有効性を示した。

## (2) オブジェクト指向による原子力機器の熱過渡応力に対する構造設計法 (笠原)

**Object Oriented Design Procedure for Nuclear Components Against Thermal Transient  
Stress**

(内容) 上記(1)と同様に計算科学研究成果の一部であり、高速炉の支配荷重である熱過渡荷重に対して、流体・構造・材料強度を一貫して評価することによって、各評価段階で生じる不確定性の排除を狙った新しい設計法の提案に関するものである。異なるコードを連携させた複雑現象の解析を困難にしている要因に、コード間のインターフェイスと入力データ作成などのマン・マシンインターフェイスの問題がある。本研究は、オブジェクト指向技術によりこれらの課題を解決し、短時間で熱過渡解析を可能としたものである。

(質疑) 流体・構造連成計算の取り扱い範囲および軽水炉への適用性に関する議論があり、熱過渡問題のような複雑現象に対する新しいアプローチとして関心を持たれた。

(3) ベローズを含む配管系の弾性追従挙動の評価法 (笠原)

An Evaluation Method of Elastic Follow-up Behavior of Piping Systems Containing Bellows Expansion Joints

(内容) 高温の配管システムでは、エルボ間、あるいはエルボと直管の間の剛性差により生じるひずみの集中を考慮しなければならない。配管長短縮のためにベローズ継手を適用した配管システムでは、通常ベローズが直管やエルボに比べて非常に剛性が低いため、ひずみ集中挙動はかなり違ってくる。本論文では、ベローズ継手配管系のひずみ集中挙動に対する基本的な考え方を示し、これに基づくモデルによる評価、さらにクリープ則を考慮した理論的な手法を展開し、簡単な例でその適用性を示した。

(質疑) 本手法の実機への適応性について関心を持たれ、実際に適用する場合の具体的方法について議論があった。

(4) 流体 - 構造連成系における非定常熱的応答特性の数値解析 (村松)

Numerical Analysis of Non - Stationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System

(内容) 高速炉プラントの配管や炉内構造物で発生する流体と構造との熱的連成挙動に対する解析的評価システムの開発と検証結果に関するものであり、高速炉設計の合理化達成を目指した研究の成果について述べるものである。従来の流体 - 構造熱的連成挙動の評価では、高速炉システムにおいて有意な影響が発生する箇所を予め同定し、この箇所を実寸大で模擬した装置によるナトリウム実験を通して行われてきた。しかしながら、このような実験的手法による当該挙動の評価では、温度差や熱伝達率などの多くの支配パラメータを分離して評価することが困難であるため、高速炉設計においてはさまざまな保守的な条件を使用し、結果として大幅な安全裕度を見込んだものとせざるを得なかった。ここでの発表では、流体と構造との熱的

連成挙動を、工学的近似モデルを使用すること無くコンピュータ・シミュレーションによって評価可能であることを示すとともに、本研究で開発した解析的評価システムにより当該連成挙動に対する機構論的な分析を通じて設計へのフィードバックを図り、大幅な経済性や更なる安全性の向上などによる高速炉設計の合理化を達成可能であることを明らかにする。

(質疑) ・各点間での温度ゆらぎ挙動に対する周波数応答関数を評価する目的は？

・熱流動計算と構造物熱伝導計算との具体的接続方法は？

## 第4章 高温構造設計基準の現状と今後に関する日米意見交換会

平成8年度から9年度までに、「もんじゅ」技術開発部に国際特別研究員として滞在された、元 ASME 高温設計委員会 委員長 B. Jetter 氏の仲介により、溶接協会の実証炉高温構造設計基準 (DDS) 委員会の主要メンバーと、ASME 高温設計委員会の指導的メンバーとの意見交換会が以下の通り行われた。

(1) 日時：1998年7月27日(月) 19:30 - 22:45

(2) 出席者：B. Jetter, H. Chung (ANL), W. O'Donnell (OCE.Inc.), B. Yoo (KAERI), C. Becht (BEC.Inc.), W. Koves (UOP), R. Campbell (EQE), M. Gold (B & W), G. Hollinger (PVRC), 渡部 (筑波大), 西口 (神工大), 坂根, 旭吉 (立命大), 高橋 (電中研), 加口, 大谷, 中馬 (MHI), 島川, 沢井 (川重), 神保 (東芝), 林 (日立), 川崎 (原電), 森下, 堂崎, 笠原 (動燃)

(3) 議事

① 高速実証炉開発状況の説明

川崎氏 (原電) より我が国の高速炉開発体制、および原電実証炉の特徴と構造設計上の課題について説明がなされた。

② 動燃における活動状況の説明

笠原より、動燃の構造・材料関係の研究開発の現状と今後の計画について紹介した。③ ASME SG-ETD の活動状況の紹介 C. Becht 氏より ASME 高温設計委員会の活動状況の紹介がなされた。Sec. III NH に関しては、アクティビティはそれほど高く、改良 9 Cr 鋼の採用を完了することとクリープ疲労評価法のメンテナンスが主な活動である。Sec. III では、部分安全係数という概念により、安全立を解析法や検査等の種類により詳細に設定するために分割することを検討している。Sec. VII では、クリープ座屈、900 °C 以上の超高温域への適用範囲の拡大、延性損耗則によるクリープ疲労損傷評価 (9 Cr だけ) に関する検討を行っている。



#### ④ PVRC における活動状況の紹介

米国溶接協会の圧力容器研究委員会 (PVRC) の中の高温設計委員会の活動状況について、委員長の W. Koves 氏より説明がなされた。Sec. VII Div.1 を対象として、弾性解析による応力が、クリープ破断強さを越える場合の安全率の見直しを検討している設計から製作、運転までを一貫して考慮する方向を考えている (IPEC 関連と思われる。) 石油化学分野への原子力コードの転用を考えているが、クリープ座屈評価等に時間依存の考え方を入れるのは難しい。現状は API 基準である。3次元構造評価法はこれまでの成果を取りまとめ、Hollinger 氏が PVP で発表している。

#### ⑤ DDS 委員会の活動状況の紹介

我が国の溶接協会の実証炉用設計基準委員会 (DDS委員会) の活動状況と、実証炉用設計基準 (DDS) の改良の方向性について、幹事の神保氏、加口氏、島川氏、および林氏紹介された。日本の溶接継ぎ手評価法は3種類 (CRIEPI, MHI, PNC) ある。延性消耗を使用したクリープ疲労評価法の弾性ルートは確立されてないため、検討する予定である。

#### (4) DDS に関連する議論

- ・ DDS で検討中の破損モードの拡大については、NH は DDS のような特定の材料やプラントを対象としたものでなく、高温機器のための汎用基準であるため、特定の評価法の導入は考えていない。
- ・ ひずみの制限値である 1%、2% の見直し提案については、高温特に多軸クリープではそれほど保守的な想定ではないと ASME 側は考えている。ASME は広範な材料を対象としているため、材料固有の理由により本制限を変えるつもりはないが、2つの鋼種に絞った DDS では異なると思われる。後者はよほど狭い範囲に成分調整を行うことも可能である。
- ・ モニタリングを前提とした安全率の切り下げについては理解できるが、ASME 基準では、材料、設計、製作、検査が互いに関連しており、ISI の程度により部分的な安全率を変更するのは難しいと思う。
- ・ 環境効果、シャープノッチ形状の継手の強度低減評価は加える必要がある。

## 第5章 聴講セッション

Session 1. 1A (FSI-29) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - I  
: Symposium Opening and Multi-Phase Systems - 1

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム I: 会議開催および多相流システム - 1)

Chair : V. V. Kudriavtsev, Watkins-Johnson Company (Scotts Valley, CA USA)

Vice-Chair : C. R. Kleijn, Delft University of Technology (Delft, The Netherlands)

螺旋状蓄熱装置における熱移行と固液相変化の数値解析 (Numerical Simulation of Conjugate Heat Transfer and Solid - Liquid Phase Transition in a Spiral Thermal Energy Storage unit)、液滴蒸発モデルにおける可変液相拡散係数 (Variable Finite Liquid Diffusivity in Droplet Evaporation Modeling)、自由液面流に対する非スタガード格子を用いた形状適合座標 (Non-Staggered Boundary-Fitted Coordinate Method for Free Surface Flows)、燃料液滴列の相互作用下における爆発過程のモデル化 (The Modeling of the Combustion of Interacting Fuel Droplet Arrays) および溶融ガラス鋳物製造のための3次元非等温流解析手法 (Tridimensional Non-Isothermal Flow Solver for Molten-Glass-Based Device Casting) の5編の論文発表から成るセッションである。

何れの発表論文も、従来技術の延長線上に位置する数値計算法を、広範な工業分野に適用した例を示したものである。これらの内、ワルシャワ工科大学による螺旋状蓄熱装置における熱移行と固液相変化の数値解析は、固液両相に亘る広い範囲の物性値を用い、螺旋状蓄熱装置の蓄熱・放熱挙動の過渡特性を十分な精度を以て模擬した成果は興味深い。すなわち相変化時の熱輸送過程は、熱伝導挙動と熱伝達挙動とが混在し、更には装置内温度勾配によって生じる自然対流を含む非常に複雑な熱流動特性であるにも係わらず、これをSIMPLE スキームを用いた差分法により高い精度で評価した。

Session 1. 1I (DA-07A) : Elevated Temperature Design Methods I (高温構造設計法 I)

Chair : M.B.Ruggles (ORNL)

Vice-Chair : H.Kaguchi (MHI)

高速炉機器の高温構造設計法の高度化 その1 : 316 FR 鋼用のクリープ疲労評価法

(Advancement of High Temperature Structural Design Method for Fast Reactor Components Part 1 : Creep-Fatigue Damage Evaluation Method for 316FR)、高速炉機器の高温構造設計法の高度化その 2 : 316 FR 鋼用の非弾性構成モデル(Advancement of High Temperature Structural Design Method for Fast Reactor Components Part 2 : Inelastic Constitutive Model for 316FR)、1 Cr Mo VTIB 鋼の繰り返し応力緩和の 2 パラメータ材料モデルを用いた予測(Prediction on Cyclic Creep Relaxation for 1 Cr Mo VTIB Using A Two Parameter Material Model)、進化的アルゴリズムと超並列計算機による非弾性構成方程式の材料定数自動同定法 (Automated Identification of Material Constants in Inelastic Constitutive Equations by Continuous Evolutionary Algorithm and Massively Processors)、高速炉運転条件を考慮した 316 FR 鋼のクリープ疲労き裂進展則の開発 (Development of Fatigue and Creep Crack Propagation Law for 316 FR Stainless Steel in Consideration on FBR Operating Condition) の 5 編の論文発表から成るセッションである。その中で電中研の通産委託研究成果がシリーズで紹介された。まず 316 FR 鋼用のクリープ疲労評価法と ASME の方法との比較がなされた。両者の主な違いはクリープ損傷評価法であり、ASME は時間消費則であり、評価精度は factor of 5、電中研は延性消耗で factor of 2 であった。延性消耗則のクライテリアは延性限界であるが、最長 4 年のクリープ試験の結果を使用して 20 % としている。クリープ損傷だけを取り上げて、時間消費則は延性消耗に比べて非安全側と主張しているが、従来の基準体系に延性消耗だけを組み込むと、合理化とは逆行する。

次に、316 FR 弾塑性構成式が紹介された。温度と荷重の両者が変動した場合の履歴中の最大硬化係数を記憶することにより OW モデルを拡張し、温度履歴の効果を考慮できるようにしたものである。現段階で、高速炉の液面近傍で問題となっている、熱ラチェットを最も精度良く評価する構成方程式として注目される。また、クリープ疲労き裂進展評価法に関しては、ひずみ速度を変化させた疲労き裂進展データからの速度効果の分離を試みた、改良疲労き裂進展を提案している。本問題は古くから認識されていたものであり、特筆すべきことはない。

**Session 1. 3A (FSI-30) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - II**  
: Fluid - Structure Interaction - 1

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム II : 流体 - 構造相互作用 - 1)

Chair : C. R. Kleijn, Delft University of Technology (Delft, The Netherlands)  
Vice-Chair : Y. Matsumoto, The University of Tokyo (Tokyo, Japan)

熱の移動および化学反応を伴う流体 - 構造連成挙動 (Fluid - Structure Interaction in the Presence of Heat Transfer and Chemical Reaction)、平板のクエンチ過程における流体 - 構造熱的相互作用の解析的検討 (Computational Investigation of the Fluid - Solid Thermal Interaction in a Plate Quench Process)、流体 - 構造作用アルゴリズムの解析と相互作用相似則 (Analysis of Fluid - Structure Interaction Algorithms and the Interaction Consistency Law)、流体 - 構造熱的相互作用評価に関する革新的手法 (A Novel Method for Thermal Fluid - Structure Fully Coupling) の 4 件から成るセッションである。

流体 - 構造連成システムを対象とした熱的相互作用に関する論文 3 編と機械的相互作用に関する論文 1 編から構成された。この中で、イスラエル工科大学による流体-構造間での熱輸送評価では、ゴーストセルと呼ぶインターフェイスセルを境界領域に用意し、流体と構造物間での熱流束を交換変数として繰り返し計算を行って、流体中エネルギー保存式と構造物中エネルギー保存式を (陽的に) 両立させる手法が紹介された。実験結果との比較より、今後の更なる検証課題が述べられた。

**Session 1. 3I** : Elevated Temperature Design Methods-II (高温構造設計法 II)

Chair : T. Shimakawa (KHI)  
Vice-Chair : M. B. Ruggles (ORNL)

ステンレス鋼のクリープ疲労評価法関連 4 件、及び配管の延性破壊評価関連 1 件の発表があった。発表はいずれも日本から。クリープと疲労を分離せず弾性追従付のクリープ疲労試験をベースに評価用の線図を作成するアイデア (R. Jetter 元もんじゅ国際特別研究員)、延性消耗理論に基づくクリープ損傷評価を軸とする FBR 用の健全性評価ガイドライン (電中研)、構造物試験とその評価 (電中研及びメーカー) がそれぞれ発表された。

**Session 1. 3L** : Piping and components I (配管と機器 I)

Chair : A. B. Glickstein  
Vice-Chair : J. McCabe

面内曲げと内圧を受ける配管エルボの限界荷重 (Limit Loads for Pipe Elbows Subjected to IN-Plane Opening Moments and Internal Pressure)、支持点の変位を受ける場合の T 管の強度解析 (Strength Analysis of Pipe Tees in Case of Support Displacement)、ベローズを含む配管系の弾性追従挙動の評価法 (An Evaluation Method of Elastic Follow-up Behavior of Piping Systems Containing Bellows Expansion Joints)、原子力プラントのボルト継手の有限要素解析 (Finite Element Analysis of Bolted Joint Assembly of Nuclear



Power Plants) の 5 編の論文発表から成るセッションである。ASME で 35 年間配管設計に携わった、座長の Glickstein 氏よりエルボの塑性崩壊評価法が紹介された。本問題に関しては微小変形理論解があり、また内圧を考慮している理論は Goodal だけであるため、内圧と曲げが重畳し大変形を考慮した場合のエルボの挙動を、ABAQUS で解析した。弾完全塑性体を仮定し初めに内圧をかけ次に曲げを加えた。微小変形と大変形で大分異なる結果となった。エルボを閉じる場合は不安定である。内圧入れると楕円変形が円形に近くなるため、座屈限界が上昇する。エルボを開く場合は、座屈までにかかなり余裕があり、崩壊荷重が最大となる圧力がある。

**Session 1. 4A (FSI-31) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - III  
: Fluid - Structure Interaction - 2**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム III : 流体 - 構造相互作用 - 2)

Chair : D. B. Spalding, Cham Ltd. (United Kingdom)

Vice-Chair : C. E. Brennen, California Institute of Technology (Pasadena, CA USA)

産業分野における計算流体力学および応力解析コードを含む流体 - 構造連成現象の解析 (Computation of Fluid / Structure Interaction with Industrial CFD and Stress Analysis Codes)、内部衝撃荷重に対する円筒シェルの構造応答 (The Structural Response of Cylindrical Shells to Internal Shock Loading)、超音速衝撃試験の 3 次元流れモデル (Fully Three Dimensional Flow Model of the Supersonic Velocity Impact Tester) の主に機械的荷重評価法に関する 4 編の論文発表から成るセッションである。

圧縮性流体のステップ状衝撃波による構造物の応答評価が主な主題の論文であり、構造物にかかる応力の周波数特性に関する評価法について述べられた。

**Session 1. 4C (MF-03) : Residual stress III (残留応力 III)**

Chair : R. Warke (Edison Welding Institute)

Vice-Chair : S. Rahman (The University of Iowa)

高応力勾配を有する参照試料の残留応力測定法と有限要素シミュレーションの評価 (Evaluation of Residual Stress Measurement Techniques and Finite Element Simulations on Reference Samples with High Stress Gradients)、管 - 管板継手の残留面圧と残留応力へのひずみ硬化の大きさの影響 (The Effect of Tube Strain Hardening Level on the Residual Contact Pressure and Residual Stresses of A Tube-To-Tubesheet Joint)、3 次元歯車形成の基礎的な有限要素解析評価 (Fundamental Finite Element Evaluation of A Three Dimensional

Rolled Thred Form)、多層溶接のき裂進展力への残留応力の効果 (Residual Stress Effects on Crack Driving Force in Multipass Welds)、の4編の論文発表から成るセッションである。溶接残留応力の非弾性有限要素解析法によるシミュレーションが盛んに行われている。高サイクル疲労では平均応力効果が無視出来なくなることから、今後注目する必要がある。熱交換器の伝熱管とそれを束ねる管板との接続は、拡管による残留応力によって生じる機械的な面圧で行うのが通常である。もんじゅの中間熱交換器も同様の施工が行われている。拡管のプロセスを非弾性有限要素解析法でシミュレートすることにより、関係する種々のパラメータの影響を調べ、材料の硬化係数が主要な因子であることを明らかにし、設計用の簡易式が提案されていた。

**Session 1. 4I : Elevated Temperature Design Methods-III (高温構造設計法 III)**

Chair : Y. Takahashi (CRIEPI)

Vice-Chair : R. Jetter (元もんじゅ国際特別研究員)

炉容器の鍛造下部鏡のクリープ破断挙動 (Creep Rupture Behavior of A Reactor Pressure Vessel Lower Head Forging)、熱応力による Y ピースモデルのクリープ疲労試験と解析 (Creep-Fatigue Tests and Analysis for Y-piece Models Under Thermal Stress)、316 FR 鋼溶接継手のクリープ疲労損傷評価法 (The Evaluation Method of Creep Fatigue Damage of 316 FR Stainless Steel Welded Joint)、軸方向温度分布の繰り返し移動を受ける 316 FR 鋼円筒構造物のクリープ疲労寿命評価 (Evaluation of Creep Fatigue Life of 316 FR Cylinder Subjected to Cyclic Movement of Axial Temperature Distribution)、熱過渡を受ける構造不連続部のき裂の発生と進展 (Crack Initiation and Propagation at Structural Discontinuities Under Thermal Transient) の5編の論文発表から成るセッションである。クリープ及びクリープ疲労評価法関連4件、並びに疲労き裂進展評価関連1件の発表があった。1件は韓国から、軽水炉の安全研究用のクリープ挙動評価に関する発表、他は日本からの発表であった。溶接継手のひずみ集中挙動の評価法 (原電及びメーカー)、炉容器液面近傍のクリープ疲労評価 (電中研及びメーカー)、参照応力法に基づく疲労き裂進展評価法による構造物試験結果の評価 (電中研及びメーカー) がそれぞれ発表された。

本会議では韓国のソウル大学からの発表が数多く見られたが、その中の一つで円筒構造物のクリープ強度評価に多軸異方性を考慮した Huddelston による方法を適用した結果が紹介されていた。結果は良くなく、その理由として静水圧の存在を挙げていたが、結果への影響の大きいクリープ曲線に Norton 則を利用している等、構造解析に粗さがあるよであった。韓国では、Huddelston のように米国で提案された方

法を導入評価した発表が多いようである。

電力共同研究の成果として、川重から Y ピースの熱応力き裂発生 / 進展試験の結果が紹介された。試験パラメータは半楕円の予き裂有りとしである。荷重は電気ヒータと水により昇温時間 10 分降温時 15 分で繰り返し熱応力を加えた。き裂の発生はポテンシャルドロップで検査した。き裂発生評価は、発生自身の定義と損傷値の定義が定まってないため、結果も個々の定義に依存する。き裂進展評価は、UK が提案しているリファレンスストレスから J 積分を評価する方法を用いている。Y ピースのリファレンス応力は、ピーク応力を無視して、曲げ応力で近似しているが、実機で問題となる浅いき裂に対する評価誤差は大きいと思われる。

同じく電共研で提案中の 316 FR 溶接継手評価法の適用例が紹介された。溶接金属 / HAZ / 母材の 3 要素モデルを考えているが、実際の計算では HAZ と母材で同じ特性を使用している。結果は、溶接部近傍のひずみ集中は液面モデルでは非常に小さく、管板モデルは少し増加している。また、溶接金属の疲労強度は母材の 1/1.4 としており、結果的にはこれが大きな保守性の要因となっている。

**Session 2. 1A (FSI-32) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - IV  
: Multi-Phase Systems - 2**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム IV : 多相流システム - 2)

Chair : A. Tomiyama, Kobe University (Kobe, Japan)

Vice-Chair : J. Banaszek, Walsaw University of Technology (Walsaw, Poland)

固体壁に対する粒子的アプローチの流れの影響 (Effect of Fluid on the Motion of a Particle Approaching to a Solid Wall)、液体窒素の沸騰二相流の数値解析 (Numerical Simulation on Boiling Two-Phase Flow of Liquid Nitrogen)、可聴キャビテーション場の可視化とモデル化 (Visualization and Modeling of Acoustic Cavitation Fields)、気泡破裂を発生させる自由液面挙動の数値解析 (Numerical Analysis of Free Surface Motion Ensuring Burst of Bubble Dome)、翼周りキャビテーション流の数値的検討 (Numerical Study of Cavitating Flow on a Hydrofoil) の、主に二相流モデル化手法 (固気あるいは固液の二相流モデリング、沸騰二相流モデリング、気液相互作用モデリング、圧縮性キャビテーション流動問題での気泡流モデリング) に関する 5 編の論文発表から成るセッションである。

相間運動量交換モデルの高精度化に着目した大学による基礎研究の成果であり、現象論的な観点からの活発な質疑応答が為された。

**Session 2. 1F & 2. 2F : TUTORIAL : Flow-Induced Vibration (流力振動の講習セッション)**

Tutorial Leader : S. S. Chen (ANL)

PVP の Senator で、ASME N - 1300 策定の主要メンバーでもある S. S. Chen による流力振動全般の講習である。基礎から評価法まで、事例を挙げながら説明された。中でもゆるく支持された管のカオス的振動、パラメトリック振動などが報告者にはなじみが薄く、特に印象に残った。また、原子力プラントにおける事例としては、軽水炉での弁の振動と大口径管に接続する小口径管の振動が挙げられていたが、口頭で報告者らのもんじゅ事故の例にも言及していた。今後のこの分野での研究のニーズとして、減衰定数を振幅の関数として表現すること、熱交換器中の流動解析コードの整備並びにそれによる伝熱管周りの正確な流速分布の把握手法の確立、管群のランダム振動、管群及び高 Re 数領域での St 数の把握、管と支持具の相互作用、等々多様なニーズを紹介していた。

**Session 2. 2A (FSI-33) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - V  
: Multi-Phase Systems - 3**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム V : 多相流システム - 3)

Chair : S. Kawano, Tohoku University (Sendai, Japan)

Vice-Chair : J. Ishimoto, Tohoku University (Sendai, Japan)

気泡流に対するマルチスケール解析 (Multiscale Analyses on Bubbly Flows)、沸騰液膨張による蒸気爆発 ~動的減圧および二相放出の影響~ (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions: The Influence of Dynamic Re-pressurization and Two-Phase Discharge)、多流体モデルによる気泡流シミュレーションのための数値計算法 (A Numerical Method for Bubbly flow Simulation Based on a Multi-Fluid Model)、石炭二相流による配管腐食挙動の数値流体力学による予測 (Two Phase Flow Coal Pipe Erosion Predictions Using CFD) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

神戸大・富山助教授による二相流モデリング手法は、極めてユニーク且つ有効な方法である。(N+1) 流体モデルと呼ばれる 3 次元非定常乱流域気泡流モデル化手法は、液相に対する 1 個の流体モデルと気泡サイズ N 個の流体モデルを取り扱うもので、従来の 2 流体モデルに比べて極めて良好な結果を与える。このモデル化手法は、径の異なる固体粒子群の液相中での振る舞いの評価にも適用できる。



**Session 2. 2B (CT-06B) : Linear and Non-Linear FEA Applications II**  
 (線形および非線形有限要素解析の応用 II)

Chair : S. Yoshida (Koyo Iron Works)  
 Vice-Chair : D. Metzger (Ontario Hydro Technology)

複合構造物の汎用有限要素解析プログラムの調査 (Software Assessment of General Purpose FEM Programs for Composite Structures)、三角形配列管板の弾塑性設計のための降伏条件 (Yield Criteria for the Elastic-Plastic Design of Tubesheets with Triangular Penetration Patterns)、内圧を受ける油貯蔵タンクの軸対称シェル要素を用いた弾塑性座屈解析 (Elastic-Plastic Buckling Analysis of the Uplifted Shell-to-Bottom Joint of Internally Pressurized Oil Storage Tanks Using Axisymmetric Shell Finite Element Method)、非線形硬化するステンレス鋼の繰り返し塑性のための2曲面構成モデルに基づく ABAQUS 用のユーザサブルーチン UMAT (An ABAQUS-Compatible User Subroutine UMAT Based on Two-surface Constitutive Models for Cyclic Plasticity of Non-Linear Hardening Stainless Steels) の4編の論文発表から成るセッションである。等価中実板を用いた管板の解析法は弾性領域では確立されているが、弾塑性に関しては報告者を含め、複数の提案がなされている。弾塑性等価中実板に関する詳細なモデルの提案がなされていた。

**Session 2. 2E (DA-04) : Stress Classification in Design & Analysis**  
 (設計と解析における応力分類)

Chair : W. J. Bees (BMX Technologies, Inc)  
 Vice-Chair : I. Nishiguchi (Kanagawa Institute of Technology)

外圧を受ける不完全楕円体とトロイドの座屈 (Buckling of Imperfect ellipsoids & Closed Toroids Subjected to External Pressure)、剛性係数低減法を用いたき裂および切り欠き付機器の限界荷重の下限界 (Lower Bound Limit Loads of Cracked and Notched Components Using Reduced Modulus Methods)、CBA 炉の熱サイクルに対する有限解析調査 (Finite Element Investigation of A CBA Reactor For the Effects of Thermal Cycling)、軸対象薄肉シェルの限界荷重の上限の近似計算 (The Approximate Calculation of Upper Bound Limit Loads for Axisymmetric Thin Shells)、塑性崩壊荷重を予測するための簡易法の比較研究 (A Comparative Study of Simplified Methods to Predict Plastic Collapse Loads)、の4編の論文発表から成るセッションである。2回の弾性解析から弾性追従係数を求め、それに基づき応力分類する方法が提案されている。日本からは溶接協会TDF委員会の成果が発表された。従来の評価断面によらない応力分類法が模索されている。

**Session 2. 3A (FSI-34) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - VI : Fundamentals and Novel Methods - 1**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム VI: 基礎および革新的技術 - 1)

Chair : Y. Matsumoto, The University of Tokyo (Tokyo, Japan)

Vice-Chair : W. Jia, Yamagata University (Yonezawa, Japan)

特性曲線法による物質境界の追跡 (Tracking Material Interface by the Transport Coordinate Method)、一般化エントロピー概念を用いた陽的陰的流体流れ計算における残留誤差の計算 (Calculation of Residual Error in Explicit and Implicit Fluid Flow Simulations Based on Generalized Entropy Concept)、3次元流れ計算結果の検証のための可視化 (Computational Flow Visualization for Validation of Numerical Solutions of Three-Dimensional Flows)、乱流ジェットに対する連成解法 (Coupled Solver for Turbulent Jets)、計算スキーム散逸誤差による数値解の分岐 (Bifurcation of the Numerical Solution with the Dispersive Error of the Scheme) の5編の論文発表から成るセッションである。

VOF法に特性曲線法を導入した任意形状境界追跡手法 (山形大) は、界面の解像度を劣化させない工夫としてユニークであるが、形状の大変形問題への適用性に難点があるとの指摘がなされた。計算スキーム散逸誤差による数値解の分岐 (INRIA, France) の発表では、非定常振動現象を解析的に取り扱う場合、数値計算スキームからの散逸誤差によって、現象の位相情報が失われる可能性が指摘された。

**Session 2. 3G : Can the Code be Simplified? (基準は簡素化できるか?)**

Chair : N. G. Cofie (Structural Integrity Associates)

Vice-Chair : M. Ueta (The Japan Atomic Power Co.)

簡素化した設計規格と基準のイメージ (Image of Simplified Codes & Standards System)、オブジェクト指向による原子力機器の熱過渡応力に対する構造設計法 (Object Oriented Design Procedure for Nuclear Components Against Thermal Transient Stress)、フランスの原子力コードにおける疲労解析 (Fatigue Analysis in French Nuclear Codes)、簡易弾塑性疲労解析のための改良アプローチ (An Improved Approach for Performing Simplified Elastic Elastic-Plastic Fatigue Analysis)、米国の原子力関係のインターネット情報 (United States Nuclear Power Internet Resources)、の5編の論文発表から成るセッションである。技術基準の簡素化に関するセッション。ISO の中に階層化された国際規格を作る試み (東大、朝田教授及び東電)、熱過渡に対する設計評価手順を簡素

化し最適設計を可能とする解析コードの開発 (動燃・笠原発表)、仏国の原子力用構造基準におけるひずみ評価用の補正係数を ASME Sec. III と比較して説明 (EdF)、同様の係数についての提案 (米国のエンジニアリング会社) のそれぞれについて発表があった。圧力設備国際規格の構想が示された。特徴は、法律で定める機能要求から、変更が容易なデータベースまでの階層型の枠組みを作り、最新技術を取り込み易くした点である。また JIS と ASME の相互呼び込みも可能とする。こうした動きの背景には、メーカ輸出市場におけるシェアへの影響を考慮した日米対欧州で压力容器の規格基準の主導権争いがある。米仏からは、低サイクル疲労評価に必要な弾塑性ひずみ範囲を弾性解析結果から予測する弾塑性ひずみ集中係数の改良案が紹介された。こうした動きは ASME の集中係数が保守的過ぎるとの認識がなされているためであると思われる。

**Session 2. 4A (FSI-35) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - VII  
: Fundamentals and Novel Methods - 2**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム VII : 基礎および革新的技術 - 2)

Chair : Z. Ziang, Tohoku University (Sendai, Japan)

Vice-Chair : T. Suzuki, Toyohashi University of Technology (Toyohashi, Japan)

水の自然対流および氷結評価のための半陰解有限要素アルゴリズムの検証解析 (Analysis of Validation of the Semi-Implicit FEM Algorithm for Natural Convection and Freezing of Water)、非定常流動計算のための新しい有限要素法 (A New Finite Element Method for Unsteady Analysis of Fluid Dynamics)、定常および非定常流れ場に対する大規模数値計算のためのナビエ・ストークス計算コード NSFLEX の開発 (Development of the Navier - Stokes Code NSFLEX for Large Scale Numerical calculation of Steady and Unsteady Flows)、非圧縮性旋回流れに対する領域分割法 (A Domain Decomposition Method for the Solution of the Incompressible Navier Stokes Equations Applied to Rotating Flows)、計算力学、数値流体力学および熱伝達の計算におけるベンチマークコードに関する幾つかのアイデア (Some Ideas of Benchmarking Computer Codes in Computational Mechanics, CFD and Heat Transfer) の 5 編の論文発表から成るセッションである。

台湾の工業技術研究所による有限要素法コード開発では、回転流体機械の設計・評価を行うために、有限要素法に動的な大渦モデル (Dynamic Large Eddy Simulation Model; DLES) を導入した。DLES では、サブグリッドモデルに現れるスマゴリンスキ

一定数の自動設定を内部的に行う機能を有し、各種渦スケールが混在するような工学問題での利用を目的とするものである。

**Session 3. 1A (FSI-36) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - VIII  
: CFD for Complex Physical and Chemical Processes**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム VIII : 複雑系物理および化学のための数値流体力学)

Chair : C. R. Kleijn, Delft University of Technology (Delft, The Netherlands)  
Vice-Chair : A. Krishnan, CFD Research Corporation (Huntsville, AL USA)

回路遮断器における電撃の数値流体計算 (CFD - Simulation of Electrical Arcs in Circuit Breakers)、Ar / Cs 非平衡プラズマディスク MHD 発電器における放出構造の数値解析 (Numerical Simulation of Discharge Structures in Ar / Cs Nonequilibrium Plasma Disc MHD Generator)、非ニュートン粘性・化学皮膜による IC 回路のプラスチック保護化におけるワイヤ旋回流れの高時間精度 3 次元計算 (Time-Accurate, 3-D Computation of Wire Sweep During Plastic Encapsulation of IC Components, with Non-Newtonian Viscosity and Curing Chemistry)、高密度ジルコニウム粒子充填下における 3 噴流プラズマ炉の数値流体計算 (CFD Simulation of Zircon Particles Treatment in Three-Jet Plasma Reactor Under Dense Loading Conditions)、3.2 MW ホッパー型冷却モータの流動伝熱挙動の数値流体計算 (CFD Simulation of Fluid Dynamics and Heat Transfer Phenomena in a 3.2 MW Hopper Suction Dredge Motor) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

化学反応や相変化などを伴う熱流動現象を取り扱う工業分野では、流体計算と熱計算、熱流動計算と構造物内熱計算などを厳密に取り扱い、これらの評価結果に基づいて製造プロセス過程の最適化などを狙う動きにある。上記連成過程の評価では、それぞれの挙動を適切に取り扱うと同時に相互作用過程も適切にモデル化して、相互の解の劣化を極力抑える必要がある。このため、それぞれの挙動の評価では、形状適合座標系や高次精度離散化手法などの利用が一般化している。連成過程の取り扱いは、解の精度を保証する観点より、陽的なアルゴリズムの利用が一般的なようである。

**Session 3. 1E : Design I (設計 I)**

Chair : D. Bhavnani (Hancocks Bridge)  
Vice-Chair : H. Kaguchi (MHI)

高温で熱膨張荷重を受ける配管の設計手順 (Design Procedure of Piping under Thermal



Expansion at Elevated Temperature)、運転中の原子力プラントの劣化および適合しない配管の分析 (Resolution of Degraded and Non-Conforming Piping Conditions at Operating Nuclear Plant)、非弾性解析により予測した弾性追従係数を用いた高速実証炉の構造設計 (Structural Design of Demonstration Fast Breeder Reactor Applying Elastic Follow-up Factors Estimated by Inelastic Analysis)、の 3 編の論文発表から成るセッションである。高温構造設計法に関するセッション。配管の弾性追従、ラチェット及び変位制御型座屈を考慮した実証炉用配管設計法の開発 (原電及びメーカ)、部分非弾性解析に基づく弾性追従係数の設定 (原電、電中研及びメーカ) に関する発表があった。原電実証炉トップエントリ方式を成立させるために新たに開発した配管設計法の紹介が MHI よりなされた。当初は配管の局所応力がシェイクダウン基準にひかかっていた。そこでシェイクダウン基準を外そうとしたが、新たに総体的に非弾性挙動が生じる領域における、クリープ疲労、ラチェット、座屈評価が必要となった。クリープ疲労は 2 箇所以上のエルボで弾性追従が生じる場合はそれぞれを加算し、さらに局所弾性追従係数を加えて評価する。ラチェット評価法は、ABAQUS により、大変形 + シェル要素 + 弾完全塑性解析解析を行い、その結果に基づき近時式を作成した。座屈は直管評価法はあるがエルボは確立されてないので、実験と解析とから評価式を提案し Se 制限を 2 倍にすることが出来た。以上の結果、2 次系配管長を、2 割から 3 割短くすることができた。原電実証炉 IHX 管板のクリープ疲労損傷が大きいため、弾性追従係数の評価に部分的に非弾性解析 (Partial Inelastic Analysis) を適用した。非弾性解析の難しさは適切な構成方程式の選定と荷重ヒストグラムの設定であるが、前者に対しては、詳細非弾性解析の結果と弾完全塑性モデルとで大きな差が無かった。荷重に対しては、大きな塑性変形を生じる事象はたった 3 回であるため、繰り返し荷重による硬化は生じないと考えられる。

**Session 3. 2A (FSI-37) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - IX**  
: Semiconductor Manufacturing

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム IX : 半導体製造)

Chair : V. V. Kudriavtsev, Watkins-Johnson Company (Scotts Valley, CA USA)  
Vice-Chair : H. Yang, CFD Research Corporation (Huntsville, AL USA)

マイクロエレクトロニクス分野における計算流体力学技術の利用 (Adoption of Computational Fluid Dynamics Techniques to Emerging Disciplines in Microelectronics)、半導体のプラズマ加工における計算モデル (Computational Model for Plasma Processing of

Semiconductors)、回転化学蒸気沈殿炉のラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor)、Czochralski 型結晶成長システムにおける非等温乱流現象の有限体積 / 要素ハイブリッド解析 (Hybrid Finite Element / Finite Volume Analysis of Turbulence and Heat Transfer in Czochralski Crystal Growth System) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

電子回路の空冷時には、空気流によって電子素子リードが弾性流力振動が発生し、最悪の場合にはリード同士が干渉しあって素子の破壊に至る。流体と構造物間での熱的および機械的相互作用を含む大規模計算問題などへの取り組みの一例が紹介された。

**Session 3. 3A (FSI-38) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - X  
: CFD in the Process Industry**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム X : 製造工業における数値流体力学)

Chair : A. Krishnan, CFD Research Corporation (Huntsville, AL USA)

Vice-Chair : V. V. Kudriavtsev, Watkins-Johnson Company (Scotts Valley, CA USA)

製造プロセスでの数値流体力学手法の利用 (CFD Applications in the Process Industry)、格子ボルツマン法による攪拌タンク内流れのラージエディシミュレーション (large Eddy Simulation of Stirred Tank Flow by Means of Lattice Boltzmann Scheme)、製薬プロセス装置設計における数値流体力学手法の利用 (The Use of Computational Fluid Dynamics in the Design of a Pharmaceutical Processor)、複数インペラを持つ大型通風容器設計のための区分モデル (Compartment Model Approach as a Design Tool for Large Aerated Vessels with Multiple Impellers) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

製造分野における数値流体計算では、単相乱流現象に標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデルが、多相流乱流現象に代数応力モデル (ASM) が採用されている。単相乱流現象の評価では、非等方性効果を考慮するため、ASM などの必要性は認識しているものの、計算時間や収束性の観点からビジネス近似に基づく標準  $k-\epsilon$  2 方程式モデルの利用に止まっている。多相流乱流現象の評価では、計算時間や収束性に難点があるものの、乱流の非等方性効果を考慮しなければ現象を模擬できないことから、ASM の利用が一般化しつつある。ただし、適用体系は、簡単なものに限られているようである。

**Session 3. 4A (FSI-39) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - XI  
: Various Applications of CFD**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム XI : 数値流体力学の各種応用)

Chair : R. Höld, Daimler Benz Aerospace (Munchen, Germany)  
Vice-Chair : M. Okubo, Tokyo Institute of Technology (Yokohama, Japan)

氷結水に満たされた傾斜タンク内成層流体の数値解析 (A Numerical Analysis of the Stratification Properties of Chilled Water storage Tanks Charged at the Freezing Point)、遠心ポンプディヒューザ内回転室の数値・実験的検討 (Simulation and Experimental Investigations of Rotating Stall in a Centrifugal Pump Diffuser)、人工心臓のための振動ポンプの数値計算による設計 (Computational Design of Vibration Pumping Device for Artificial Heart)、Bark 式ボイラの計算機援用最適化 (Computer Aided Optimization of a Bark Boiler)、空気ダクト性能に関する研究 (Study of the Performance of Airducts) の 5 編の論文発表から成るセッションである。

**Session 4. 1A (FSI-40) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - XII  
: The Use of CFD in Shape Optimization**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム XII : 形状最適化問題への数値流体力学の利用)

Chair : F. Owens, CFD Research Corporation (Huntsville, AL USA)  
Vice-Chair : J. Derksen, Delft University of Technology (Delft, The Netherlands)

下流側で均一流を得るための多孔質整流装置の自動抵抗調整 (Automated Optimization of Porous Resistances of the Flow Straightener to get a Uniform Flow in the Downstream)、改良有限体積法による CAD および CFD 間の境界壁の撤去 (Overcoming of Barrier Between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method)、ノズル設計のための乱流形状最適化手法 (A Turbulent Flow Shape Optimization Method for Nozzle Design)、形状積分 CFD による形状の最適化 (Shape Optimization Using Geometry Integrated CFD) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

任意性が高い形状最適化問題では、実験的アプローチよりも数値計算アプローチに分があるようである。実験的アプローチに対する優位性を確保するため数値計算を階層的に捉え、形状全体のイメージを掴む荒い解析から、圧力損失などの工学パ

ラメータを評価する詳細解析までを用意し、必要に応じて数値解析のレベルを選定している。しかしながら、装置の性能を大きく左右する箇所への適用はこれからの課題のようである。これを実現するためには、数値解析解に対する信頼性の定量評価が不可避となる。

**Session 4. 1G & 4. 2G : What is New in the Code? (ASME 基準の動向)**

Chair : D. Canonico (Combustion Eng. Inc.)  
Vice Chair : M. D. Bernstein (FosterWheeler Energy Corp.)

ASME B & PV Code の各 Section ごとに最近の動向 (新しく変わった点) の発表が行われた。

**Session 4. 1E : Transient Thermal Hydraulics and Coupled Structural Response-I**

Chair : Y. W. Shin (ANL)  
Vice-Chair : S. Kimura (金沢大)

流力振動のセッション。渦励起振動に関する空気実験の評価結果が発表された (金沢大、岡島教授)。本データは、機械学会の検討会で同期振動領域回避判定基準のうち 3 番目のクライテリアにおいて換算減衰  $C_n$  を 2.5 以上 (PNC 方針では ASME と同じ 1.2 以上) としていることと直接関係するデータのひとつである。

**Session 4. 2A (FSI-41) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - XIII : Thermal Radiation**

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム XIII : 熱輻射)

Chair : V. I. Colovitchev, Chalmers University of Technology (Gothenburg, Sweden)  
Vice-Chair : N. Behera, Numeritec Corporation (Lebanon, NH USA)

任意 3 次元場における輻射熱伝達 (Radiation Heat Transfer in Arbitrary Three-Dimensional Systems)、3 次元溶鉱炉解析コード AIOLOS の実規模検証 (Industrial-Scale Validation of the 3D-Furnace Simulation Code AIOLOS)、非等方性非灰色物体内の 3 次元輻射熱伝達 (Three-Dimensional Radiative Transfer in Anisotropic, and Nongray Media)、溶鉱炉における輻射・対流現象のモデル化 (Combined Radiation and Convection Modeling in an Industrial Furnace) の 4 編の論文発表から成るセッションである。

**Session 4. 2I (DA-12A) : Fracture mechanics analysis (破壊力学解析)**

Chair : S. Kubo  
 Vice-Chair : K. K. Yoon

大砲のき裂発生に結びつく圧縮熱降伏 (Compressive Thermal Yielding Leading to Heat-Check & Hydrogen Cracking in A Fired Cannon)、軸対称荷重を受ける円筒中の任意の位置の環状き裂に対する応力拡大係数 (Stress Intensity Factor of An Arbitrarily Located Circumferential Crack In Axisymmetrically Loaded Cylinders)、アルミニウム円筒の荷重 - き裂抵抗特性のISO試験と結果 (ISO Test Method and Results on Sustained Load-Cracking Resistance of Aluminum Cylinders)、高温ステンレス鋼の表面疲労き裂進展に及ぼす応力周波数の影響 (Effect of Stress Frequency on Fatigue Surface Crack Propagation in Stainless Steel at High Temperature)、原子力配管の未貫通き裂の弾塑性破壊力学挙動 (Elastic Plastic Fracture Mechanics Behavior of a Part-Through Crack in Nuclear Piping)、の5編の論文発表から成るセッションである。

熱応力を受ける配管のき裂進展評価に関して以下の有益な情報が得られた。軸方向の温度分布の影響が心配される場合は3次元解析で調べる必要がある。き裂が存在することによる温度場の乱れにも注意する必要がある。端部までの距離が十分にあり、無限遠方の荷重とみなし得る場合は、変位制御と荷重制御の差は無くなる。しかし、周方向の温度分布により、変位制御と荷重制御の混合になる場合は、端部フリーの板厚内温度分布による応力拡大係数と、端部拘束の応力拡大係数の割合を変えた重ねあわせで模擬する等が必要になる。

**Session 4. 3A (FSI-42) : International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application - XIV**  
 : Combustion - 1

(産業への応用を含む流体 - 構造 - 化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム XIV : 爆発 - 1)

Chair : R. R. Linn, Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, NM USA)  
 Vice-Chair : N. Hamill, CFX International (Didcot, United Kingdom)

ボイラおよび溶鉱炉中の化石燃料の燃焼数値計算 (Computational Simulations of Fossil Fuel Fired Industrial Boilers and Furnices)、焼却炉廃棄物層での爆発計算 (Numerical Simulation of Combustion in Waste Layer of Stoker-Type Incinerator)、2 MW 天然ガス乱流燃焼炎からの局所乱流反応量の解析的予測 (Analysis of Local Turbulent Reaction Rates From CFD Predictions of a 2 MWt Natural Gas-Fired Turbulent Diffusion Flame)、乱流化学反応炉における超音速場水素爆発過程の高精度計算スキームによ

る計算 (Numerical Study on Combustion of Hydrogen in Supersonic Airflow Using High Resolution Scheme for Turbulent Chemically Reactive System)、旋回安定化混合爆発過程のシミュレーション (Simulations of Swirl-Stabilized Premixed Combustion) の 5 編の論文発表から成るセッションである。

圧縮性流体爆発燃焼解析では、乱流挙動により反応量が支配される。このため、乱流現象を如何に精度良く模擬するかが計算全体の精度を左右する。反応量を支配する乱流挙動は、レイノルズ応力や乱流熱流束などの 2 次モーメントであることから、乱流モデルの構築に当たっては 3 次モーメントに対しての近似がなされる。この近似では、勾配拡散型のモデリングが採用されているようである。質疑では、実反応挙動を支配する長さ・時間スケールと計算メッシュ幅、時間刻み幅、モデル化上仮定した各種スケールとの対応関係が議論の中心となった。



## 第6章 感想

PVP 会議を日本機械学会の類似の会議と比較すると、大学関係者に比べて企業からの参加者が中心で、より実務に直結した発表が多い。我が国ではその時々々の流行(数年前の破壊力学、近年の複合材料と微視解析)があるが、PVP では各分野のニーズに応じて非常に広範囲の発表がなされている。非弾性構造最適化研究の観点から、高温構造と規格基準のセッションを聴講したが、高温構造設計分野のアクティビティに関しては圧倒的に日本が高い。材料の高温挙動に関する基礎的な研究は米国でも行われているが、高温に関する発表は多くのセッションに散らばっており聴講が難しい。セッションごとに発表論文の囲い込みがなされているようである。また熱過渡強度評価研究の観点から、機器・配管、設計のセッションを聴講した。丹念に調べると、他産業においても高速炉と類似の熱応力の問題があり、ヒントとなる情報が得られる。このあたりは米国の裾野の広さを感じる。(笠原)

会期中、「産業への応用を含む流体-構造-化学システムのための数値計算技術に関する国際シンポジウム(International Symposium on Computational Technologies for Fluid / Structure / Chemical Systems with Industrial Application)」における大半の論文発表を聴講した。発表論文は極めて広い技術範囲に亘ったものの、数値計算技術に関する最新成果と工学分野への応用実績に関して様々な情報を得ることができた。しかしながら、対象範囲を広げすぎたことなどもあり、企画者本来の意図や目的が霞んでしまった感は拭えない。

熱流動分野と構造分野とに跨るサーマルストライピング現象のような境界領域に対する研究活動は、その具体的実施に係わる困難さもさることながら、会議におけるセッションの適切な構成を行うことの難しさにも直面する。基本的に、これまで個別に実施されてきた学問領域の組み合わせの数ほどになる境界領域分野を、「連成」といったキーワードのみで一括りにすること自体、無理がある。今後の会議に運営に期待したい。(村松)

今回の PVP 会議は ASME / JSM E 共催ということで、発表も日本及び米国からのものが多かったが、各セッションを共同で構成するようには必ずしもなっておらず、日本のセッション、米国のセッションというように分かれているような印象を受けた。また、投稿論文のセッションへの振り分けもごく粗いくくり方で行われている

ようで、セッションのテーマがはっきりしている場合がむしろ少なかったように感じた。このためか、ひとつの論文発表ごとの人の出入りが頻繁であった。このあたりが共催の難しいところなのかもしれない。

聴講の感想としては、一般論的だが、最初に研究の目的や背景を最低限説明しておかないと、聴講者には内容はわかっていても不満が残るということ。こうしたケースが散見されたため、自分としては今後ともこうした点に留意するようにしたい。

帰路では関空を利用したが、夜 7 時ごろの到着であったため、敦賀に停車する大阪方面からの北陸線の特急がなくなっていまい、新幹線で米原を経由して帰ることとなり、時間的にも肉体的な疲労の点でも、関空利用のメリットがやや損なわれ、事前の調査不足を後悔した。(堂崎)

## 付録I PVP プロシーディングスリスト

- PVP-361 Structures Under Extreme Loading Conditions - 1998, Edited by H. Levine
- PVP-369 Pressure Vessels and Piping Codes and Standards - 1998, edited by B. Lubin and T. Tahara
- PVP-362 Severe Accidents and Topics in the NESC Project, edited by S. Bhandari
- PVP-363 Flow-Induced Vibration and Transient Thermal-Hydraulics - 1998, edited by M. K. AuYang
- PVP-364 Seismic Engineering - 1998, edited by G. B. Rawls
- PVP-365 Fatigue, Fracture, and High Temperature Design Methods in Pressure Vessels and Piping - 1998, edited by K. K. Yoon
- PVP-366 Technologies in Reactor Safety, Fluid-Structure Interaction and Sloshing, and Natural Hazard Engineering, edited by Brochard and S. J. Chang
- PVP-367 Analysis of Bolted Joints - 1998, edited by K. H. Hsu and T. Sawa
- PVP-368 Analysis & Design of Composite, Process, and Power Piping & Vessels - 1998, edited by D. K. Williams
- PVP-369 Integrity of Structures and Components; Nondestructive Evaluations - 1998, edited by H. H. Chung and C. Monahan
- PVP-370 Finite Element Applications: Linear, Non-Linear, Optimization and Fatigue & Fracture, edited by J. F. Cory, J. F. Gordon, and Y. Narita
- PVP-371 High Pressure Technology 1998, edited by L. Picquer and M. Kawahara
- PVP-372 Risk Assessment Technologies, and Transportation, Storage and Disposition of Radioactive Materials, edited by F. L. Cho and R. Hafner
- PVP-373 Fatigue, Fracture and Residual Stress, edited by S. Rahman
- PVP-374 Fatigue, Environmental Factors, and New Materials, edited by Har Mehta
- PVP-375 Fitness-For-Purpose Evaluations in Petroleum and Fossil Power Plants, edited by M. Prager and M. Zako
- PVP-376 Component Analysis and Evaluation, Aging and Maintenance, and Pipe Supports, edited by L. I. Ezekoye and T. Sawa
- PVP-377-1 Computational Technologies for Fluid / Thermal / Chemical Systems with Industrial Applications, Volume-1 - 1998, edited by V. V. Kudriavtsev and W. L. Cheng
- PVP-377-2 Computational Technologies for Fluid / Thermal / Chemical Systems with Industrial Applications, Volume-2 - 1998, edited by C. R. Kleijn and S. Kawano
- PVP-378 Seismic, Shock, and Vibration Isolation - 1998, edited by H. H. Chung and K. Ishida

付録Ⅱ 発表用 OHP

ASME/JSME Joint  
Pressure Vessel and Piping Conference

July 26-30, 1998  
San Diego, California

*MONJU ACCIDENT AND LEARNING FROM IT*  
**HISTORY OF FLOW-INDUCED  
VIBRATION INCIDENT IN MONJU**

*M. Morishita and K. Dozaki*

**Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation**

# MONJU: Japanese Prototype FBR

- ▣ Sodium-cooled loop-type reactor
- ▣ 280 MWt (714 MWe)
- ▣  $PuO_2 - UO_2$

May 1983:

Approval of construction

October 1985:

Construction started

April 1991:

Installation of equipment completed

May 1991:

Pre-operational test started

April 1994:

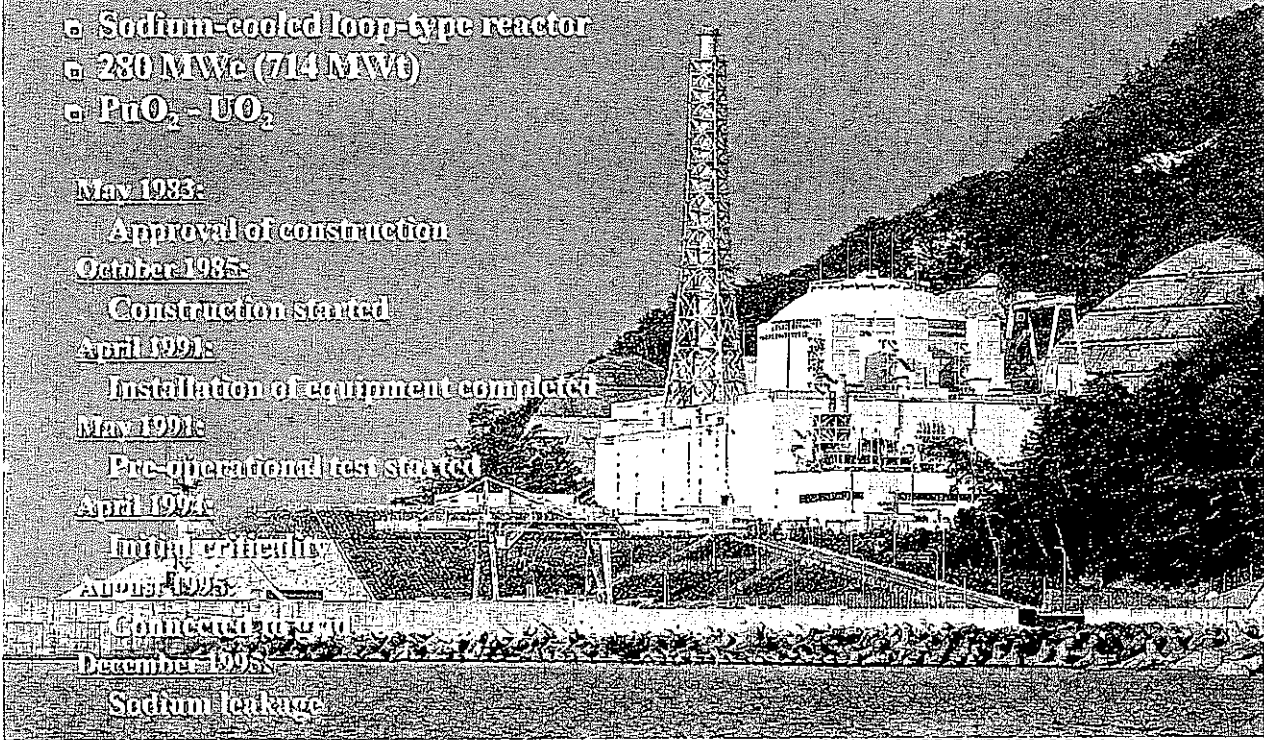
First criticality

August 1995:

Completed a year

December 1995:

Sodium leakage

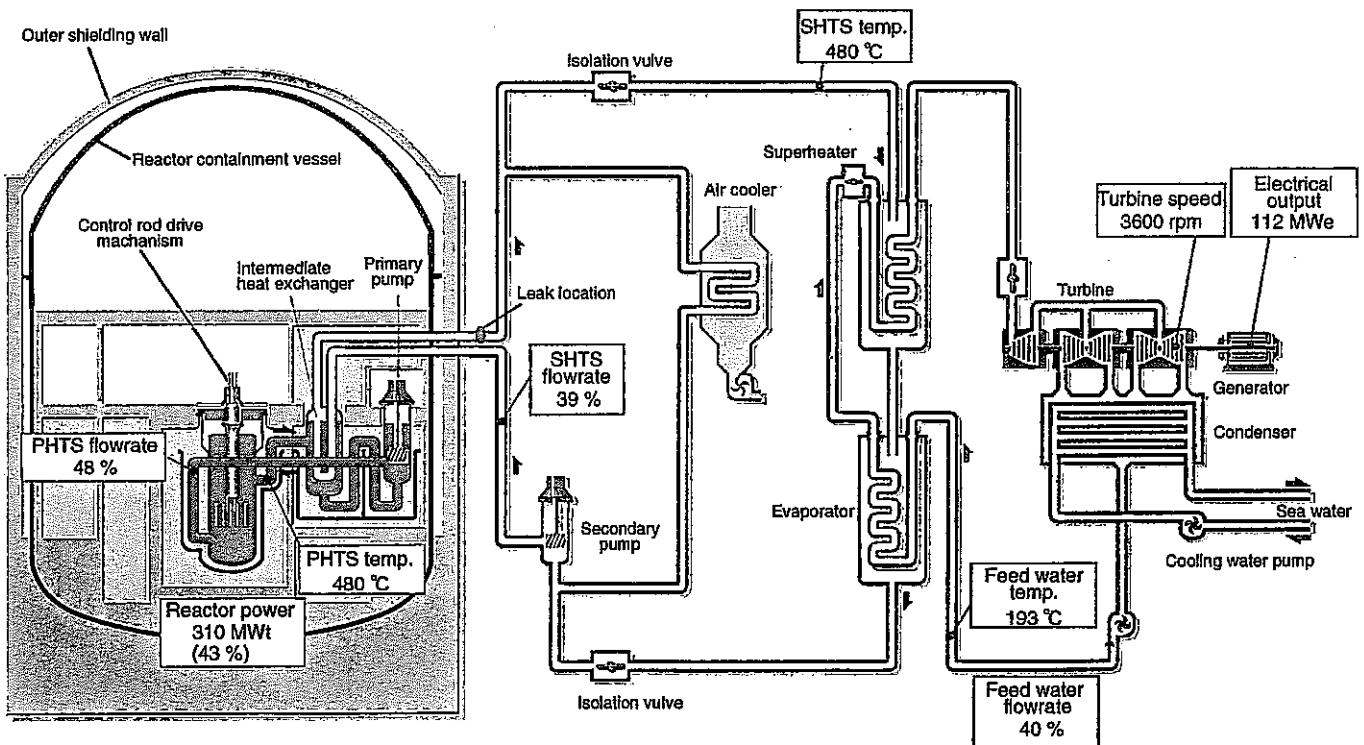


July 27, 1998

OEC/PNC MM

ASME/JSME PVP '98 Monju 1-1

## MONJU Plant Condition (just before the sodium leak)



# Sodium Leakage Incident Development

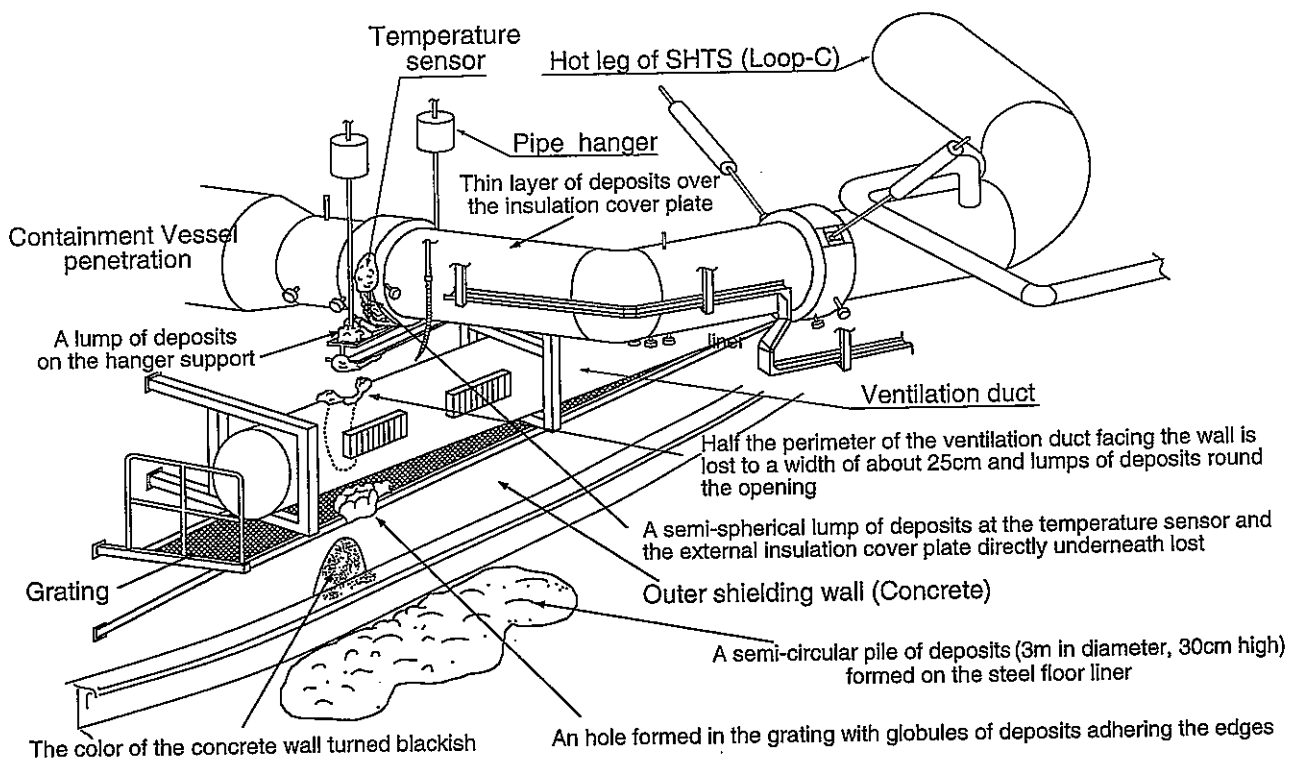
- ▣ Plant Operating Condition (December 8, 1995)
  - Reactor power: 43%, Secondary sodium temp: 480°C
  
- 19:47 Alarms activated (high sodium temp., fire, and leak detector)
- 20:00 Normal shut down operation started
  - <= Leakage was judged to be small scale
- 20:50 Number of activated alarms increased
- 21:20 Reactor manually tripped
  - <= Judged that leakage enhanced
- 22:40 Sodium drainage from the loop started, completing on 00:15
  
- ▣ The reactor was safely shut down and sodium leakage was ceased.
- ▣ Total amount of leaked out sodium: 640kg (estimation)
- ▣ There was no release of radioactive material nor sodium compound to the surrounding environment.

July 27, 1998

OEC/PNC MM

ASME/JSME PVP '98 Monju 1

## Sketch of the Affected Area





# **CAUSE OF FLOW-INDUCED VIBRATION OF THERMOCOUPLE WELL**



**Kenji Ogura\* Masaki Morishita\*\***

**Akira Yamaguchi\*\***

**\* : TOSHIBA Corp.**

**\*\* : Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.**

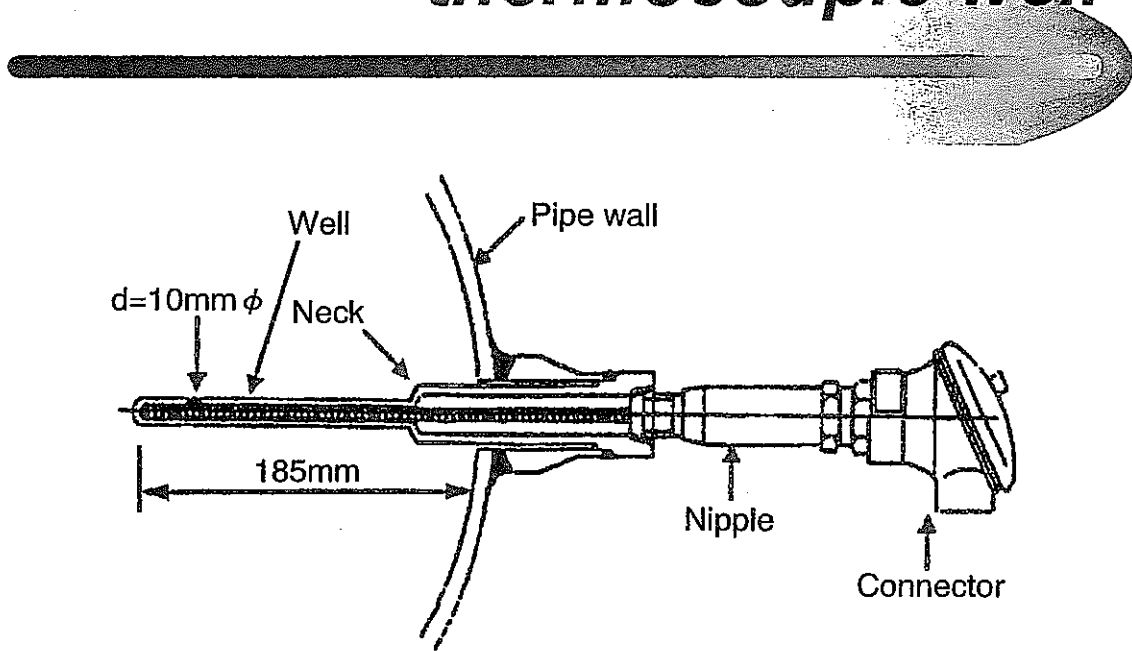
## Contents

- ◆ *Objectives*
- ◆ *Flow-Induced Vibration Test*
- ◆ *Numerical Simulation*
- ◆ *Conclusion*

## Objectives

- ◆ *To Investigate the Flow-Induced Vibration of thermocouple well*
  - *Flow rate dependency(100% and 40% flow rate(sodium leakage occurred))*
  - *Effect of crack growth*
  - *Effect of sheath condition in the well*

## ***Schematic drawing of the thermocouple well***

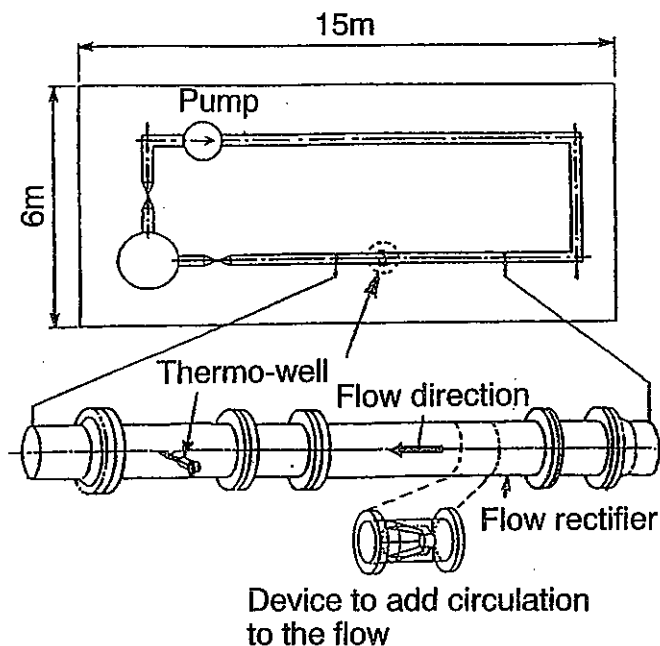


## ***FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Facility)***

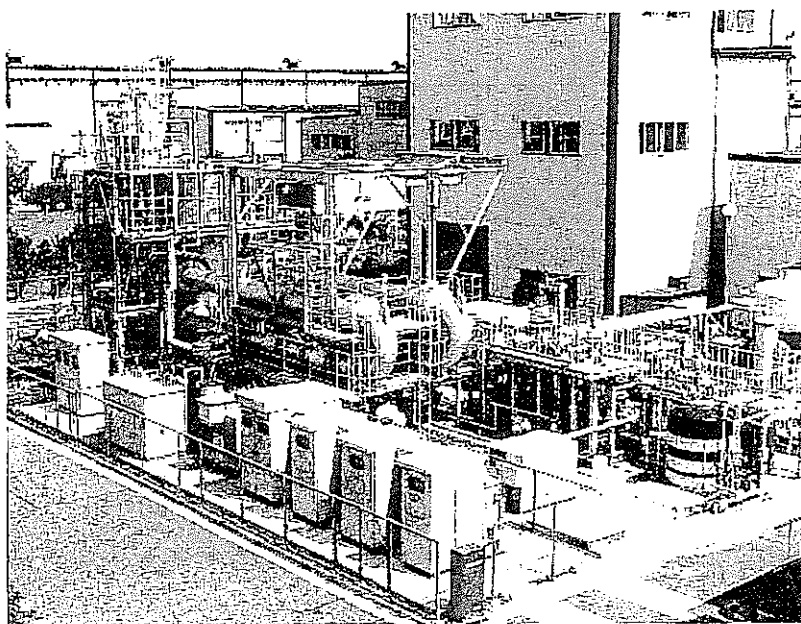
### ***◆ High temperature water flow test loop***

- *Piping : 558.8mm(O.D.) and 9.5mm(wall thickness)*
- *Water temperature : controlled*

# High temperature water flow test loop



# High temperature water flow test loop(photo)



## **FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)**

### ◆ **Test Parameters**

1. *Flow velocity and Reynolds number (effect of flow condition)*
2. *Natural frequency of T/C well (effect of crack growth)*
3. *Sheath condition*

## **FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)**

### ◆ **Flow Velocity ( v )**

- *Sweep from 1m/s to 8m/s*  
*40% flow rate :  $v=2.2\text{m/s}$*   
*100% flow rate :  $v=5.5\text{m/s}$*
- *$V_r (=v/fd) : 0.4 \sim 3.2 (f=250\text{Hz})$*

*where v: Average flow velocity (m/s), d: Diameter of well tube (m), f: Well natural frequency (Hz).*

## **FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)**

### ◆ Reynolds number ( $Re$ )

*Simulation of sodium kinetic viscosity  
as the actual condition and flow velocity  
as parameter*

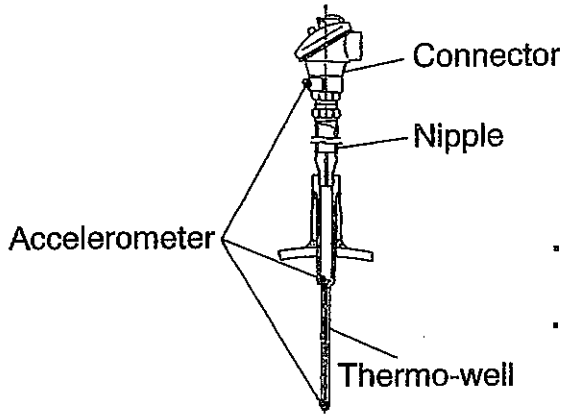
- *Water temp. 57 °C (sodium 200 °C) ( $\sim 1 \times 10^5$ )*
- *Water temp. 78 °C (sodium 325 °C) ( $\sim 1.4 \times 10^5$ )*
- *Water temp. 98 °C (sodium 450 °C) ( $\sim 2 \times 10^5$ )*

## **FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)**

### ◆ Natural frequency of T/C well

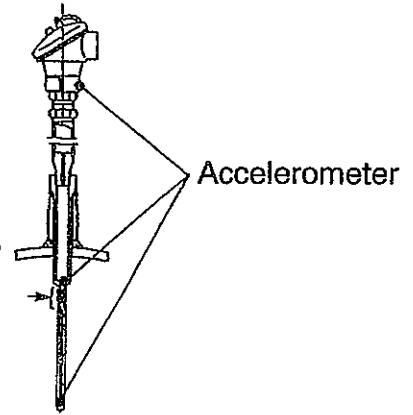
- *Intact T/C well model :  $\sim 250\text{Hz}$*
- *Reduced natural frequency  
T/C well model :  $\sim 110\text{Hz}$   
(assuming a crack)*

# Concept of thermo-well model



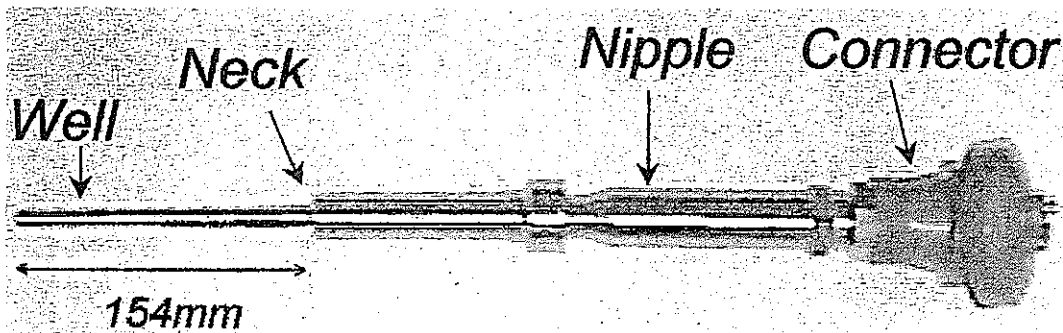
Intact thermo-well model  
( $f=250\text{Hz}$ )

- Reduce wall thickness to 1 mm (30 mm range)
- Fill the resin to keep well diameter 10 mm



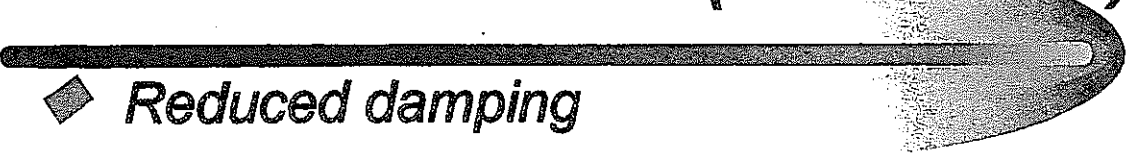
Reduced natural frequency model  
assuming the crack  
( $f=110\text{Hz}$ )

# Thermocouple well model (photo)





# FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)



## ◆ Reduced damping

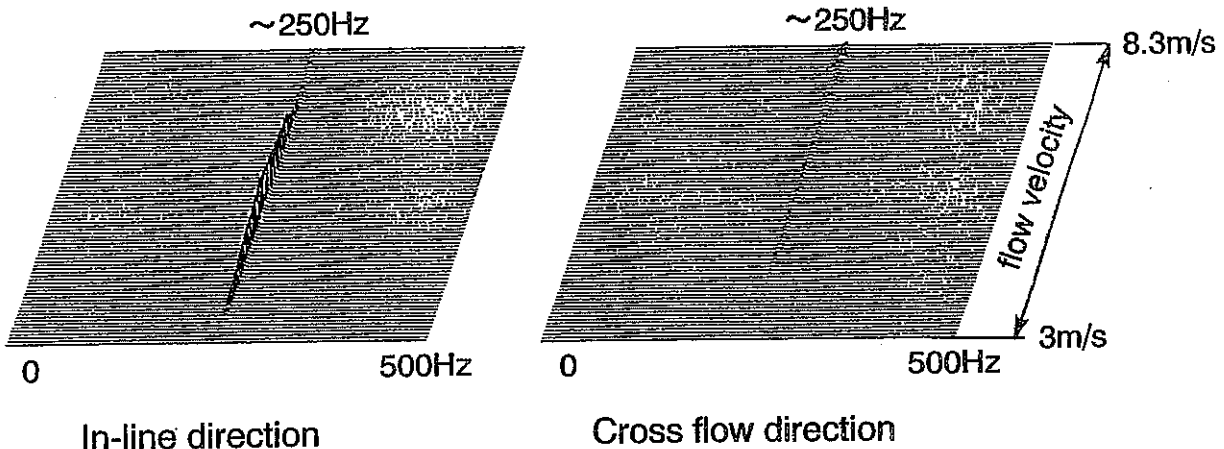
$$C_n = \frac{4\pi\xi_n \int_L m_t(x) \phi_n(x)^2 dx}{\rho d^2 \int_{L_e} \phi_n(x)^2 dx}$$

- $m_t$  : Total mass per unit length of well (kg/m)
- $\xi_n$  : Damping ratio (-)
- $\rho$  : Density of fluid (kg/m<sup>3</sup>).
- $\phi_n$  : n-th vibration mode
- $L_e$  : Length of well in the fluid (m)
- $L$  : Length of well (m)

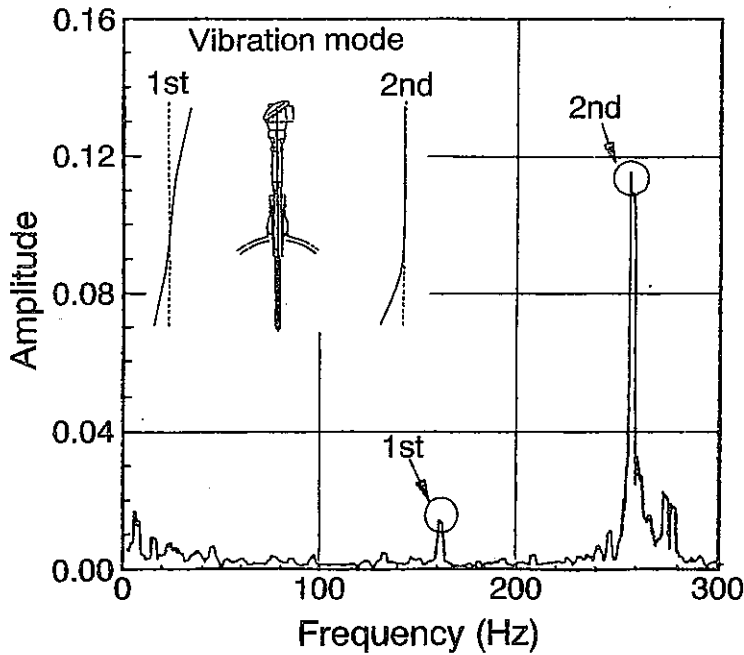
(Ex.)  $C_n(\text{test})/C_n(\text{actual}) = 0.92$

(sodium 200 °C simulated condition)

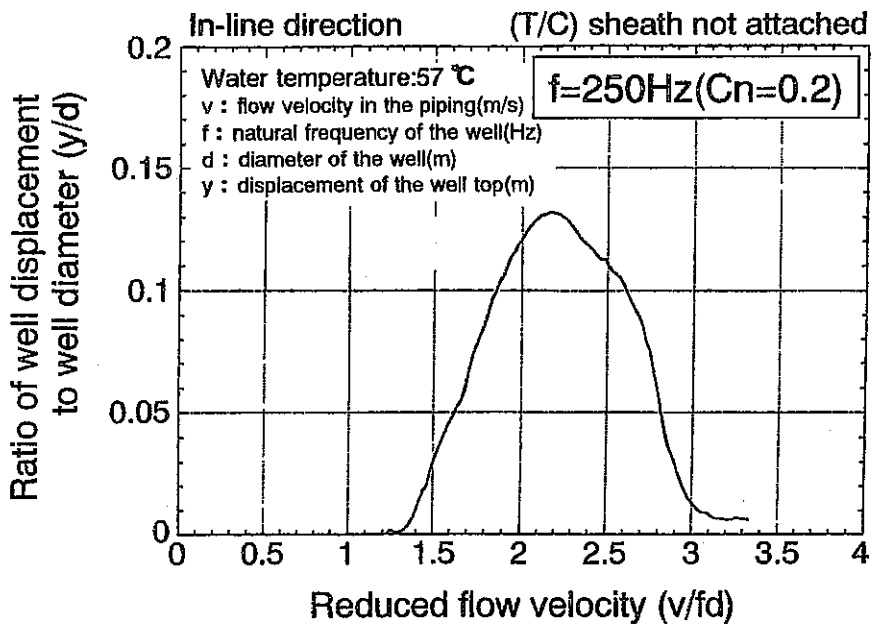
## Natural frequency in the velocity sweep test



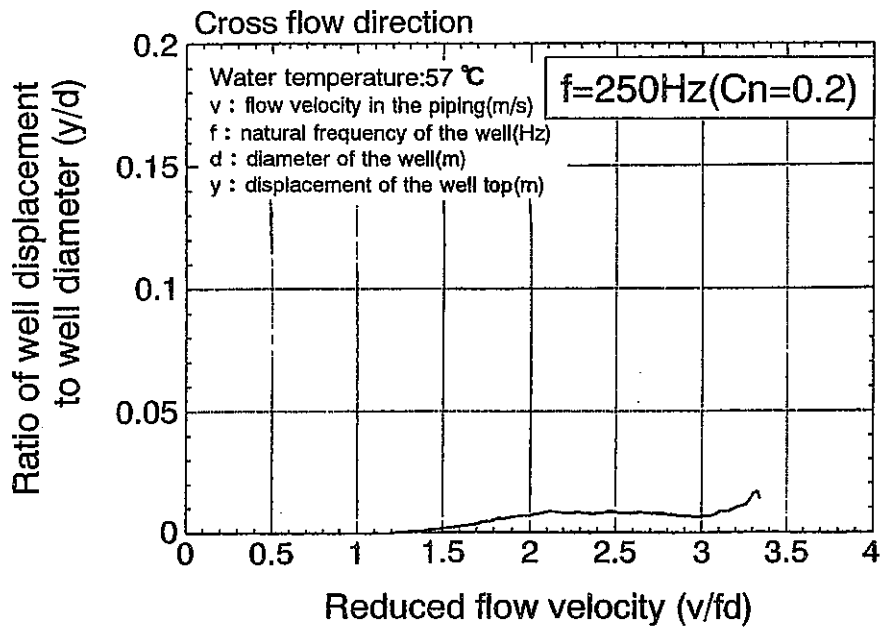
# Transfer function of thermo-well displacement



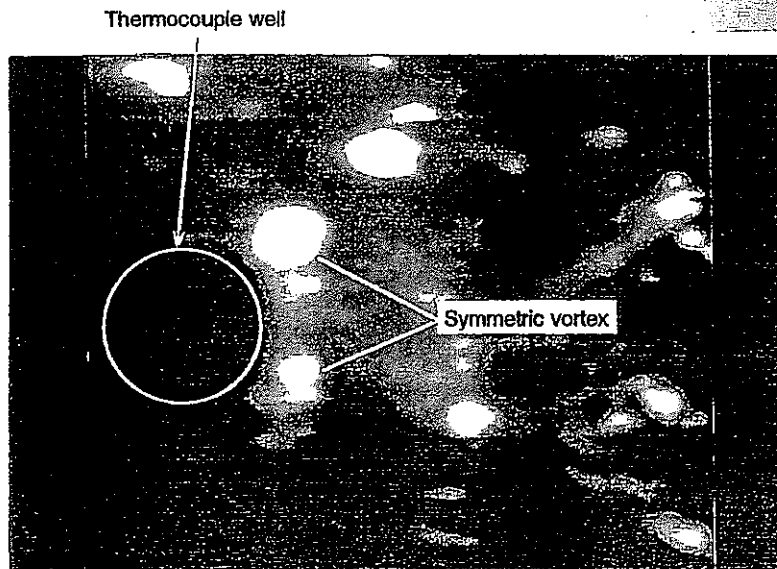
## In-line displacement of the well (intact well, 57 °C)



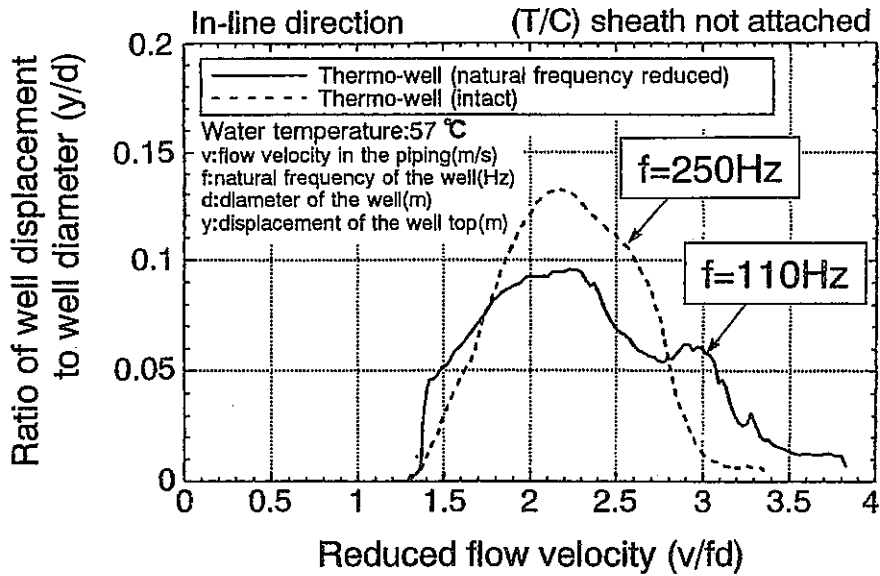
## Crossflow displacement of the well (intact well, 57 °C)



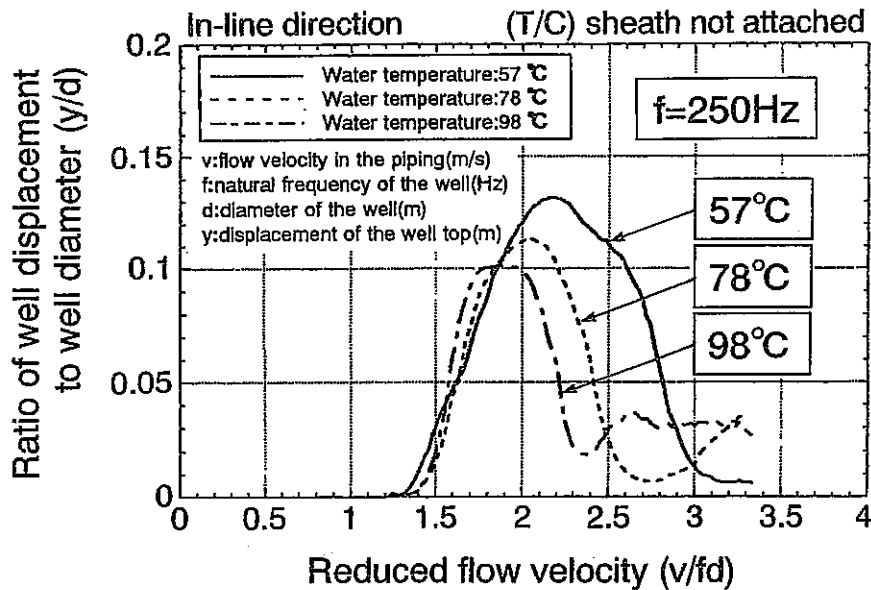
## Visualized symmetric vortex around the thermocouple well



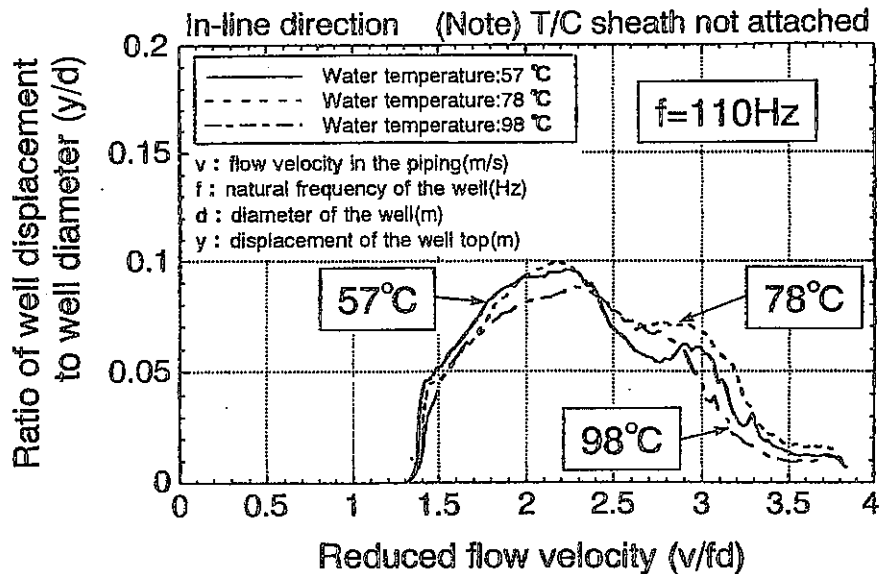
## ***Effect of natural frequency of thermocouple well***



## ***Effect of water temperature (intact well)***



## **Effect of water temperature (natural frequency reduced well)**



## **FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)**

### ◆ Insertion condition of thermocouple sheath

- A sheath condition of the damaged well was presumed to be different from other non-damaged well.

(1) Damaged well      ⇒ Bent at the neck

(2) Non-damaged well      ⇒ Almost straight  
(not bent at the neck)

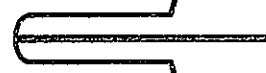
# FLOW-INDUCED VIBRATION TEST (Parameters)

## ◆ Test parameters

(1) without sheath



(2) with straight sheath

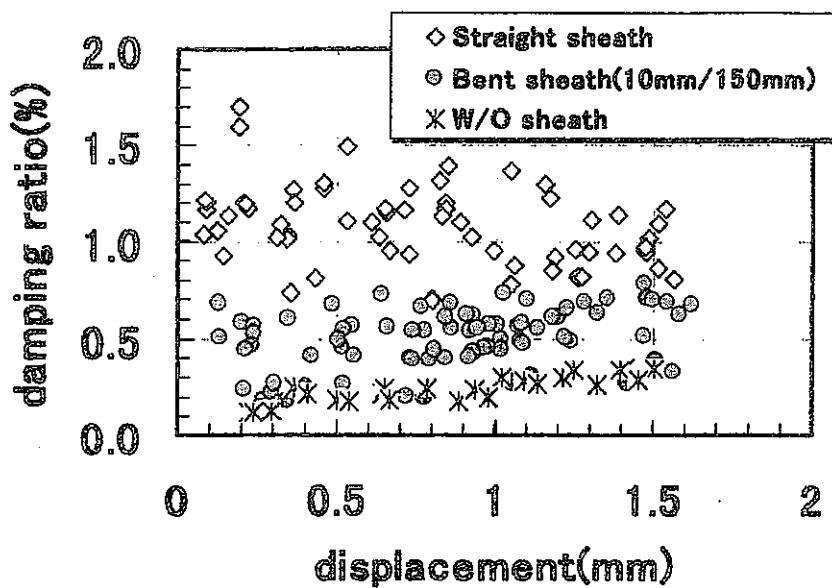


(3) with bent sheath

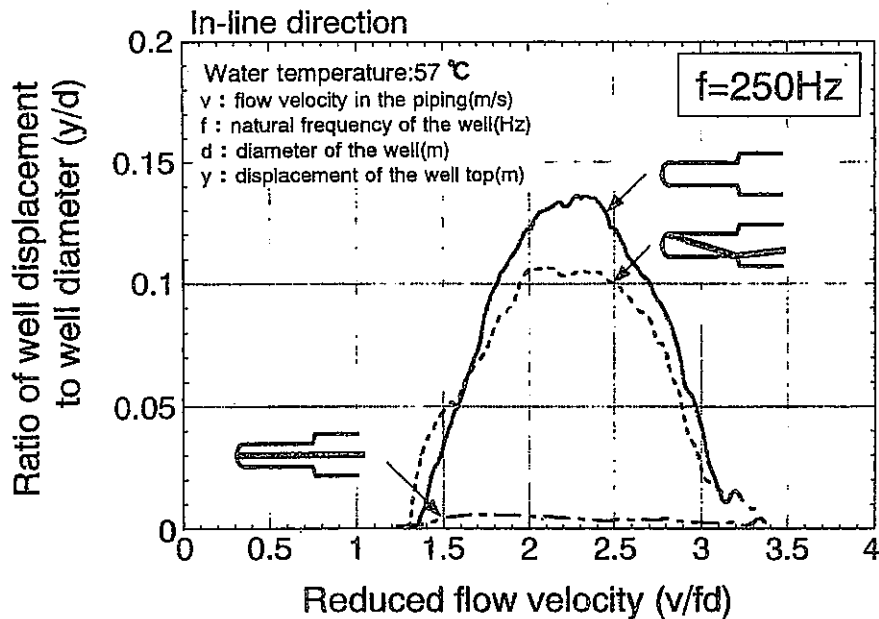


(Sheath of damaged T/C)

## Effect of sheath on the damping ratio



## Effect of sheath condition in the well



## Numerical Simulation

### ◆ Simulation code

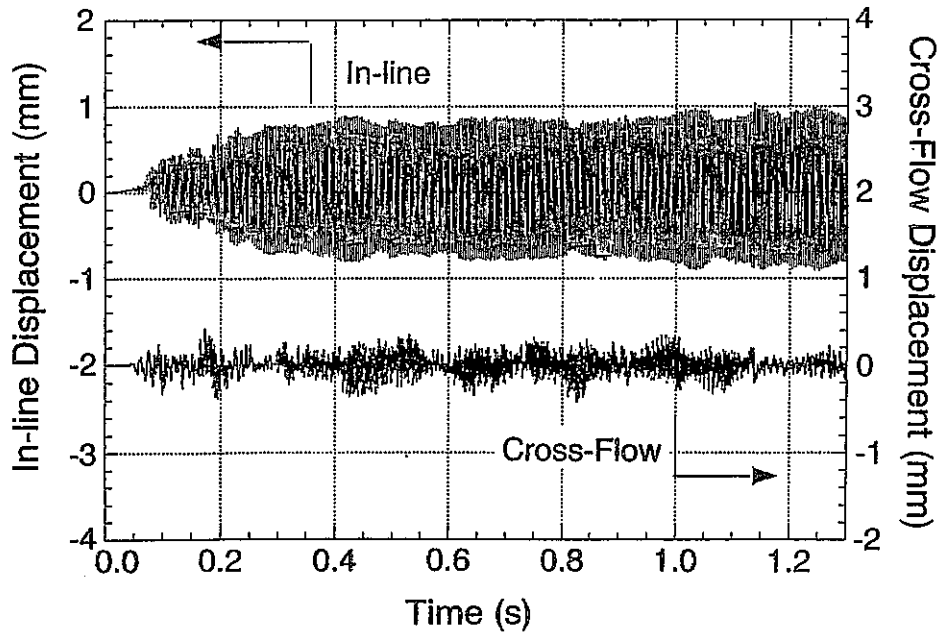
*SPLASH* code : 2-D fluid structure coupled model by ALE method

### ◆ Analysis of actual operating condition

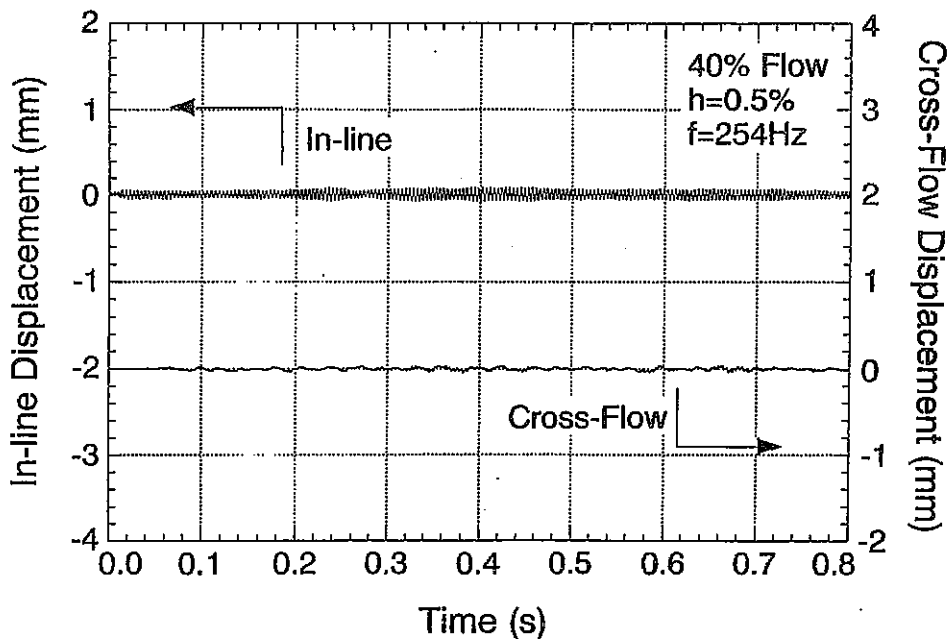
- 100% flow rate (200 °C) : intact well
- 40% flow rate (485 °C) : intact well
- 40% flow rate (485 °C) : reduced natural frequency well



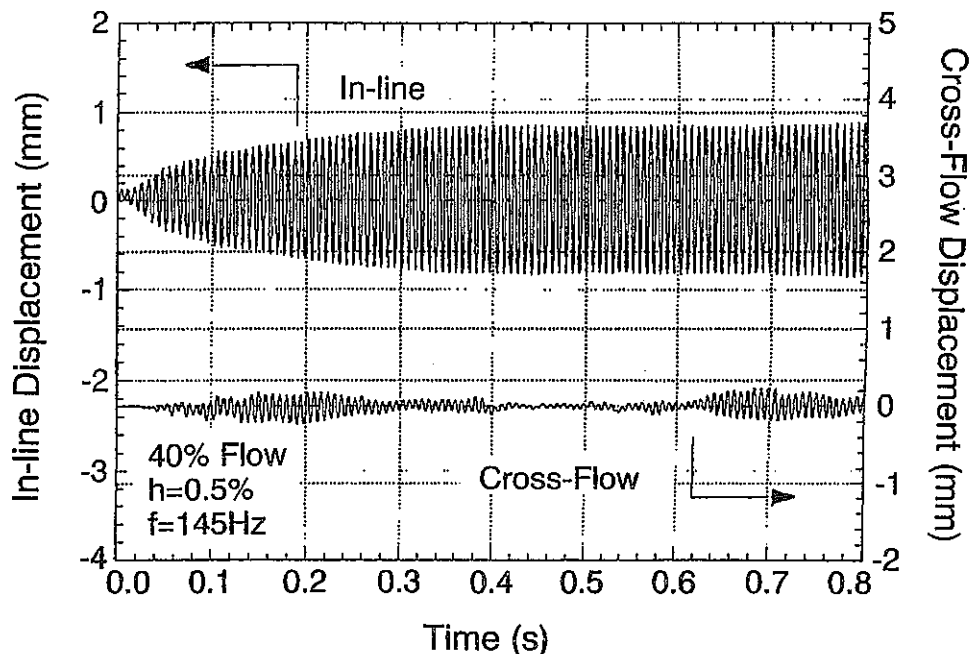
## ***Time history of the displacement response of the well***



## ***Time history of the displacement response of the well at 40% flow***



***Time history of the displacement response of the well with reduced natural frequency at 40% flow***



***Conclusions***

- ◆ *As a result of a water flow test, in-line vibration of the T/C well was measured which started at  $V_r \sim 1$  followed by a peak at  $V_r \sim 2$*
- ◆ *It was shown that the displacement response of the thermocouple well was represented by the reduced flow velocity for both result of natural frequency :  $f=110\text{Hz}$  &  $250\text{Hz}$ .*

## **Conclusions(cont.)**

- ◆ *Effects of several factors on in-line vibration was investigated by the test. And an insertion condition of T/C sheath was found to be influential on damping ratio and in-line vibration.*
- ◆ *Based on the water flow test and analysis, it was probable that in-line vibration occurred in the T/C well with the 100% flow rate and also with the 40% flow rate when the natural frequency of the well was reduced due to crack growth.*

ASME/JSME Joint  
Pressure Vessel and Piping Conference

July 26-30, 1998  
San Diego, California

*MONJU ACCIDENT AND LEARNING FROM IT*

**FATIGUE ANALYSIS OF  
THERMOWELL DUE TO  
FLOW-INDUCED VIBRATION**

*M. Morishita and Y. Wada*

**Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation**

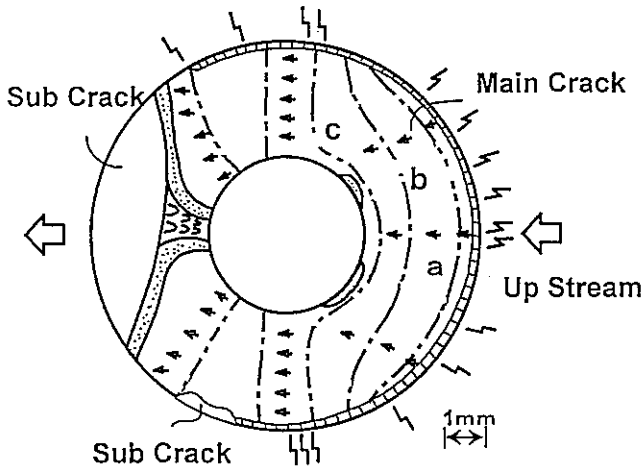
ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 0

# Fractographic Observations

- : Crack initiation/coalescence
- : Low propagation rate
- : Striation
- : Dimple
- : Steps
- : Direction of Growth
- : Estimated Crack Front



**High CYCLE FATIGUE CRACK:**  
 - Initiation, propagation and final failure -

Main crack was formed by coalescence of several initial cracks on the upper stream side

*Line a:* Extremely low propagation rate  
*Line b:* Relatively high propagation rate  
*Line c:* Extremely low propagation rate or crack arrest

Final rupture at dimple region

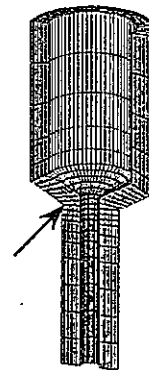
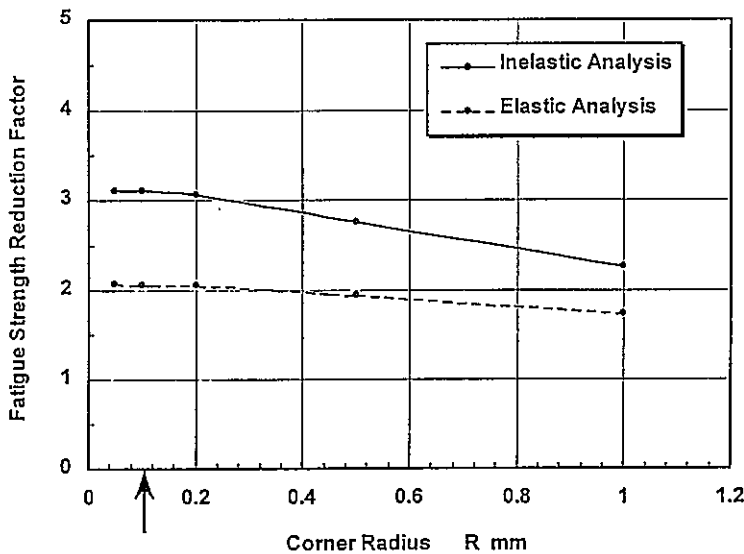
ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 1

# Stress Analysis for Structural Discontinuity

Strain Concentration at Taper Corner

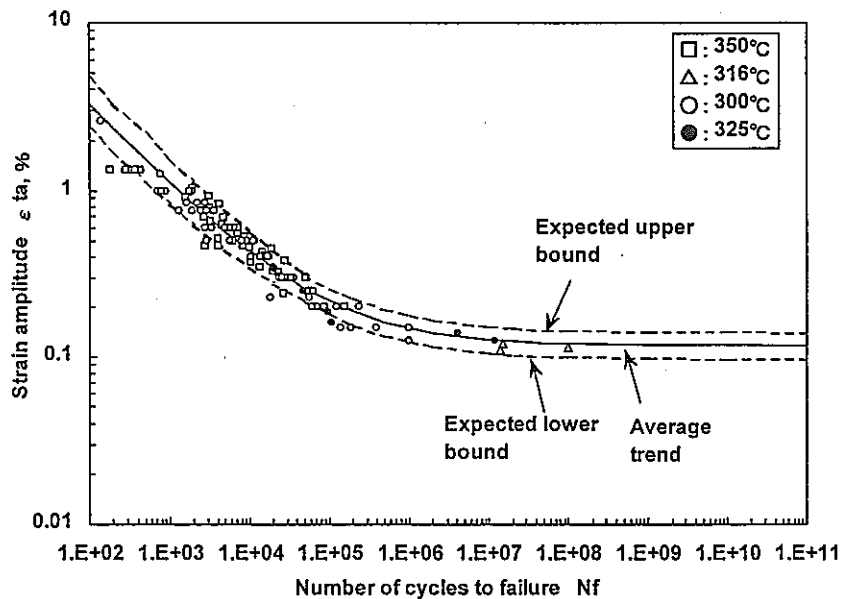


ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 2

# Fatigue Curve

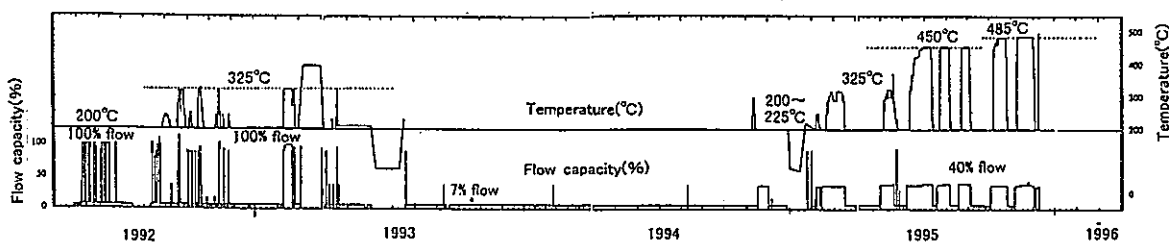


ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 3

# Plant Operation History



Period	Temperature C	Flow Rate %	Duration hour
May - Aug. 1992	200	100	216
Sep. 1992 - Jun. 1993	325	100	500
Jul. 1993 - May 1995	200	7, 40	2000
Jun. 1995 - Dec. 1995	450, 485	40	3000

ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 4

# Fatigue Damage Evaluation

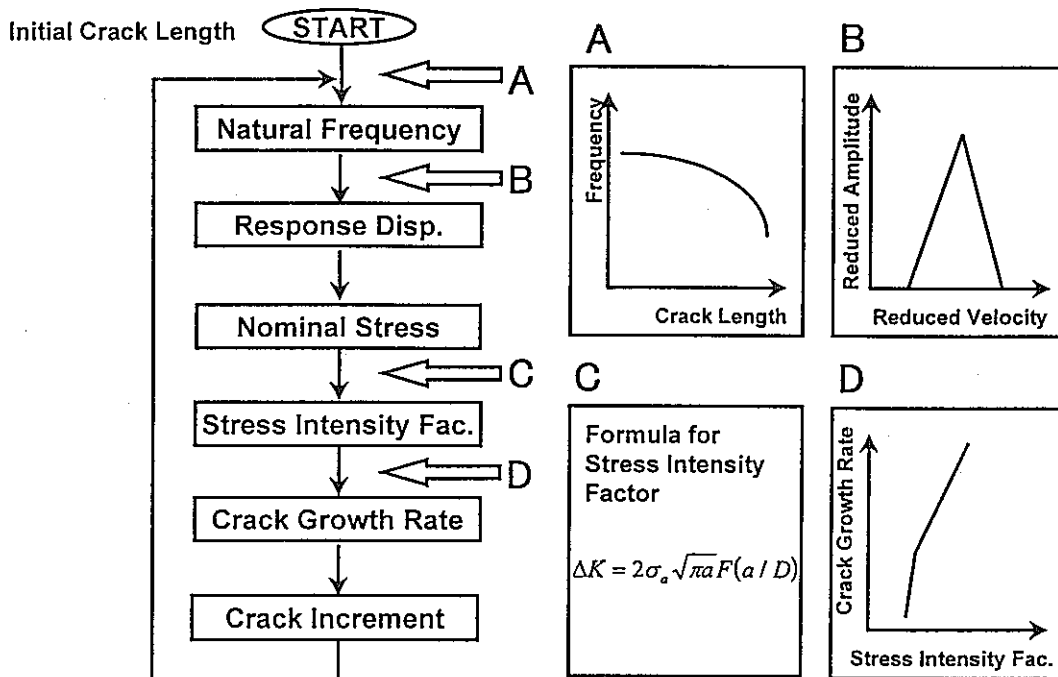
100% flow rate operation			
Temperature	C	200	325
Duration	Hour	216	500
Flow Velocity	m/s	5.2	5.2
Natural Frequency	Hz	257	251
Reduced Velocity	---	2.02	2.07
Reduced Amplitud	---	0.091	0.097
Nominal Stress	MPa	100	101
Fatigue Life	Cycles	1.0E+06	2.0E+05
	Hour	1	0.2

Fatigue Life corresponds number of cycles or time to fatigue crack initiation, NOT to final failure

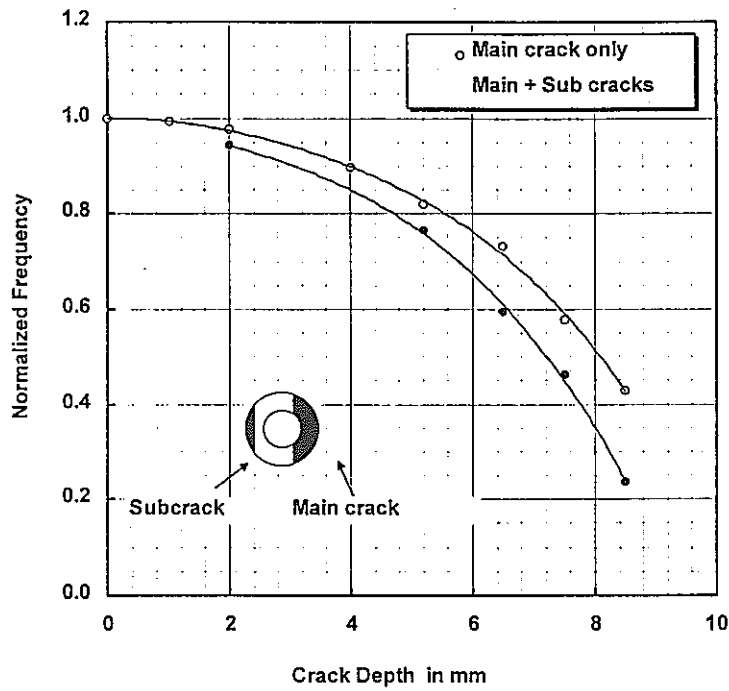


**QUESTION:**  
 WHY DID FINAL FAILURE TAKE PLACE  
 NOT IN THE 100% FLOW RATE OPERATION,  
 BUT IN THE 40% FLOW?

## Crack Growth Analysis - Analysis Flow -



## Crack Growth Analysis - Frequency Reduction by Crack Growth -

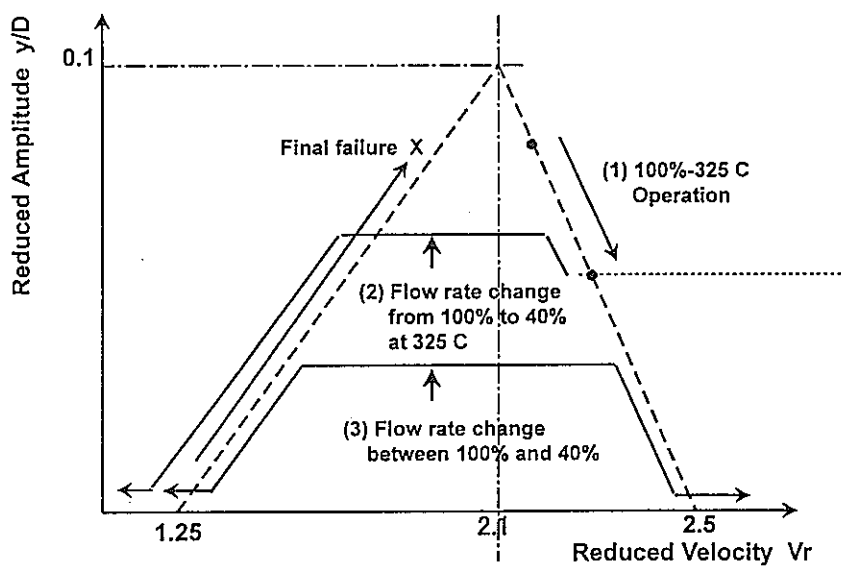


ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 8

## Crack Growth Analysis - FIV Response with Crack Growth -



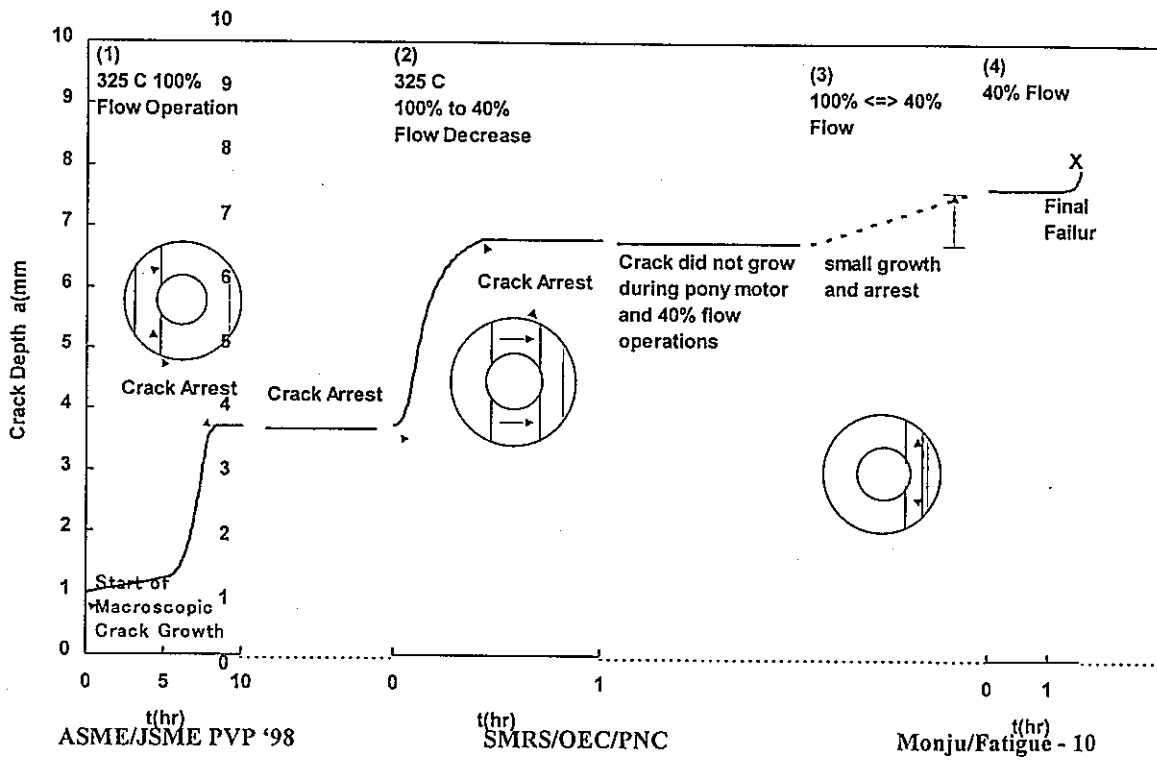
ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 8

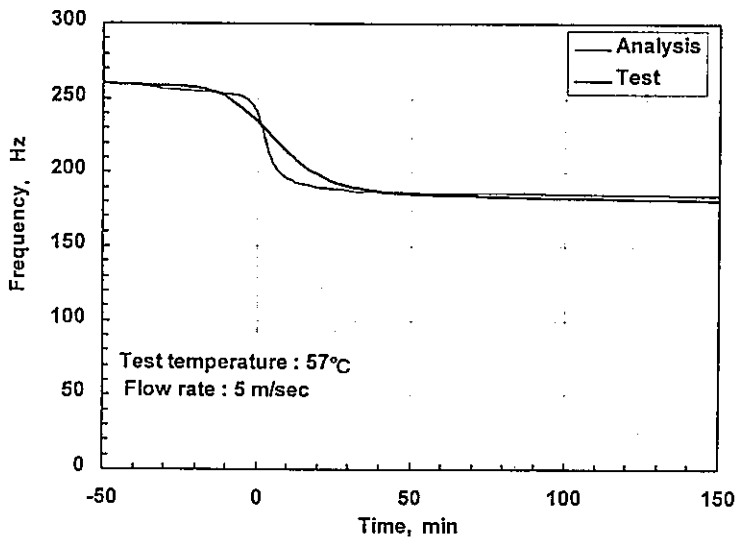


# Crack Growth Analysis - Crack Growth Behavior-



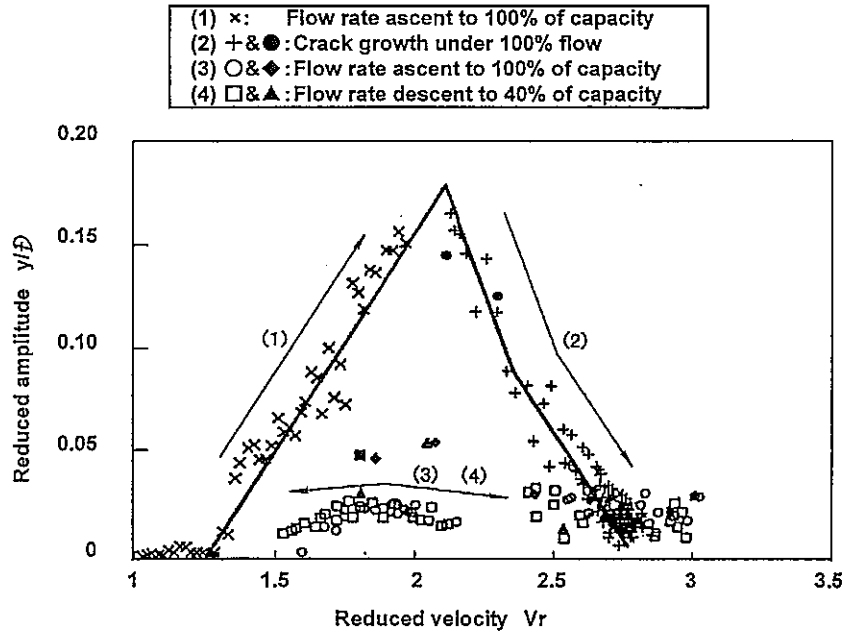
# Fatigue Test by FIW

Frequency change due to crack growth



## Fatigue Test by FIV

### Variation in FIV Response due to Crack Growth (In-line Oscillation)



ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 12

## High Cycle Fatigue Failure -Summary-

### Failure Process Estimation

- Fractographic observation indicates high cycle fatigue failure
- Fatigue cracks were estimated to initiate at an early stage of 100% flow operation by in-line oscillation of thermowell.
- The crack grew during 100% flow operation and arrested due to the lowered natural frequency.
- The crack advanced again during the period of flow rate variation(100%- 40%)
- When the crack further grew, the natural frequency was reduced and in-line oscillation began to occur under 40% flow condition to lead to final failure.
- The above failure process estimation coincides with fractographic observation. Similar crack behavior was also reproduced in FIV fatigue test.

ASME/JSME PVP '98

SMRS/OEC/PNC

Monju/Fatigue - 13

# **MODIFICATION AND DESIGN GUIDE OF THERMOWELL FOR FBR**

**Koji DOZAKI, Masaki MORISHITA & Koji IWATA**

**Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation (PNC)**

PNC/MONJU

1

# Contents

## ■ MODIFICATION OF MONJU THERMOWELLS

- Cause Investigation⇒Modified Design
  - Stress Concentration at the Neck⇒ Tapered Cylinder
  - Flow-Induced Vibration(FIV)⇒ FIV Design Guide
  - No Suppression of leaking sodium
    - ⇒ Suppression Mechanism & Leak Detection System

## ■ PNC FIV DESIGN GUIDE FOR THERMOWELLS

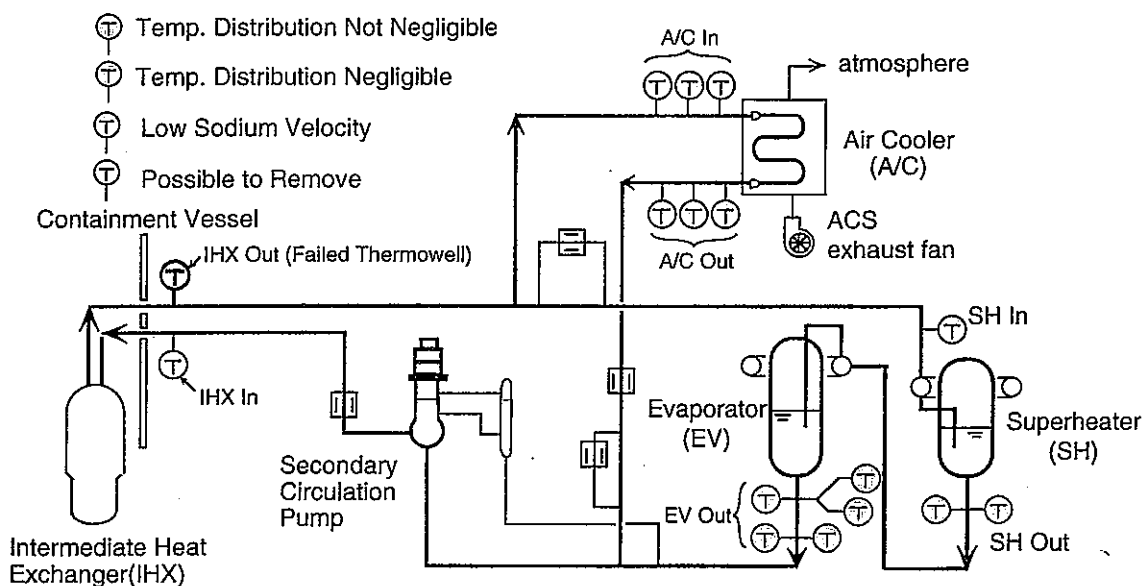
- Basically follows ASME B&PV Code Sec.III Div.1 App.N-1300
- Some Additional Evaluation Methods

PNC/MONJU

2

## Existing thermometers and their modification plan on the secondary cooling system of Monju

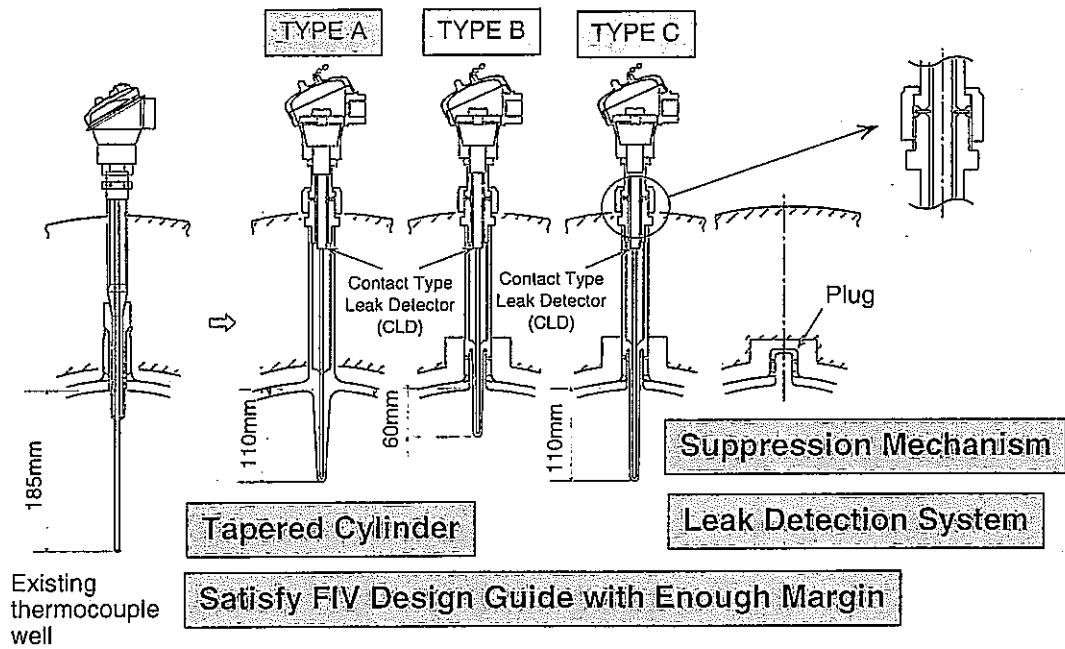
**Well length : as short as possible, but long enough to measure the average temperature over the pipe cross section.**



PNC/MONJU

3

## Modified Design Concepts of thermowells



PNC/MONJU

4

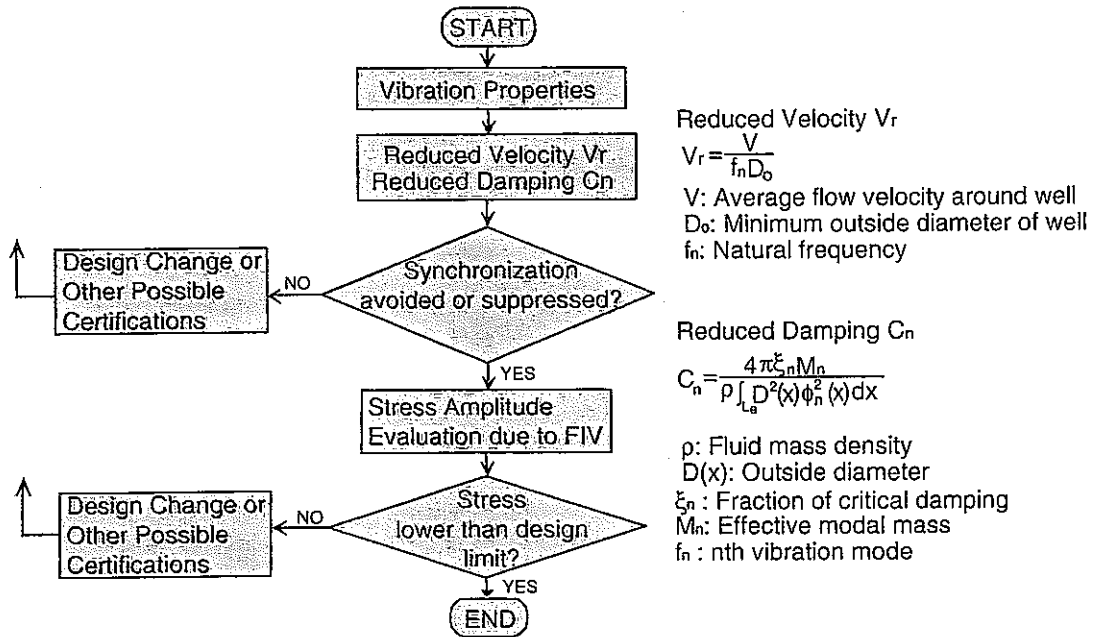
## PNC FIV Design Guide for Thermowells Difference from ASME N-1300

		ASME N-1300	PNC FIV Design Guide for Thermowells
Criteria for Avoidance and Suppression of Synchronized Vibrations		(a) $V_r < 1$ (b) $C_n > 64$ (c) $V_r < 3.3$ and $C_n > 1.2$ (d) $f_n < 0.7f_s$ or $f_n > 1.3f_s$	(1) $V_r < 1$ (2) $C_n > 64$ (3) $V_r < 3.3$ and $C_n > 1.2$
Evaluation of	Vortex-induced Vibration	Resonant Vortex-Induced Displacement Amplitude	Off Resonant Vortex-Induced Displacement Amplitude
Flow-Induced	Random (Turbulent Buffeting) Vibration	Predict Based on a Power Spectral Density Function	Predict Based on an Original Power Spectral Density Function
Stress Amplitude	Allowable Fatigue Limit for Design	None	Prepared

PNC/MONJU

5

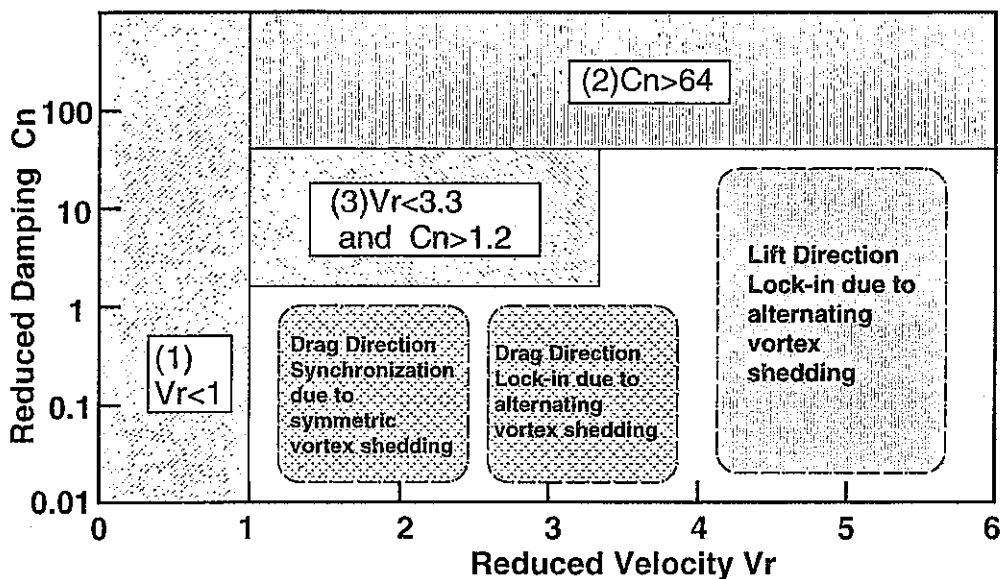
# FIV Evaluation Procedure



PNC/MONJU

6

## Criteria for Avoidance and Suppression of Synchronized Vibration



PNC/MONJU

7

## Flow-Induced Displacement Prediction

### ▀ Forced Vibration Response by Karman Vortex Shedding

$$y_{L,n}(x) = \frac{\rho V^2 \alpha_L \int_{L_e} D(x) \phi_n(x) dx}{2(2\pi f_n)^2 \int_0^L m_t(x) \phi_n^2(x) dx} A_L \phi_n(x), \quad y_{D,n}(x) = \frac{\rho V^2 \alpha_D \int_{L_e} D(x) \phi_n(x) dx}{2(2\pi f_n)^2 \int_0^L m_t(x) \phi_n^2(x) dx} A_D \phi_n(x)$$

$A_L, A_D$  : Dynamic Amplification factors  
 $\alpha_L, \alpha_D$  : Fluctuating Lift and Drag Coefficients,  
 Determined from Experimental data

### ▀ Response to Random Excitation by Turbulence (ASME N-1342.1)

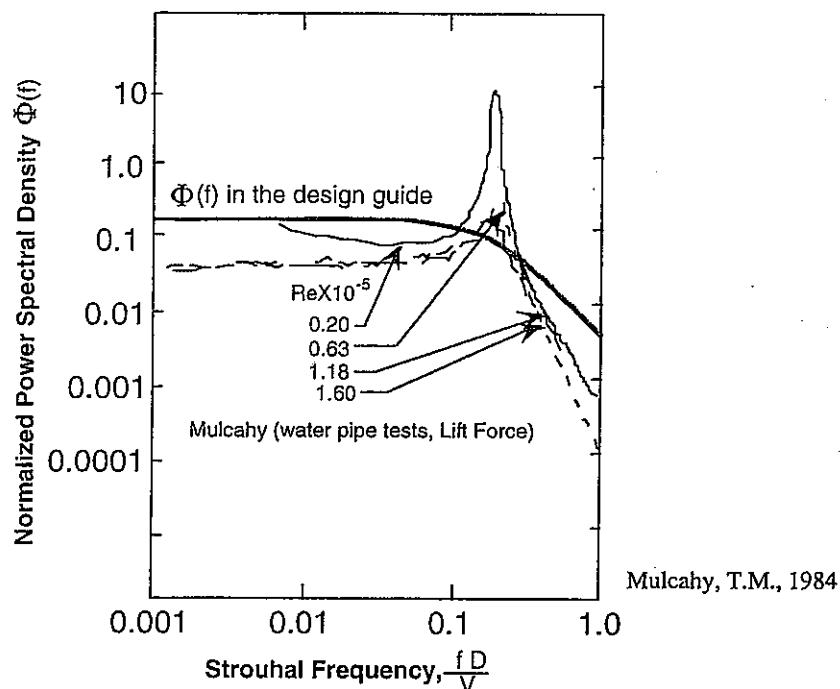
$$y_{R,n}(x) = C_0 \sqrt{\frac{L_e G_F(f_n) J^2 \int_{L_e} \phi_n^2(x) dx}{64\pi^3 M_n^2 f_n^3 (\xi_n + \zeta_n)}} \phi_n(x)$$

$G_F$  : Single-sided power spectral density of turbulent fluid force per unit length  
 $J^2$  : Joint acceptance  $G_F(f) = \Phi(f) (\frac{1}{2} \rho V^2 D_m)^2 (D_m/V)$   
 $C_0$  : Peak factor  
 $\xi_n$  : Structural damping,  $\zeta_n$  : Fluid damping

PNC/MONJU

8

## Power Spectral Density in PNC FIV design guide

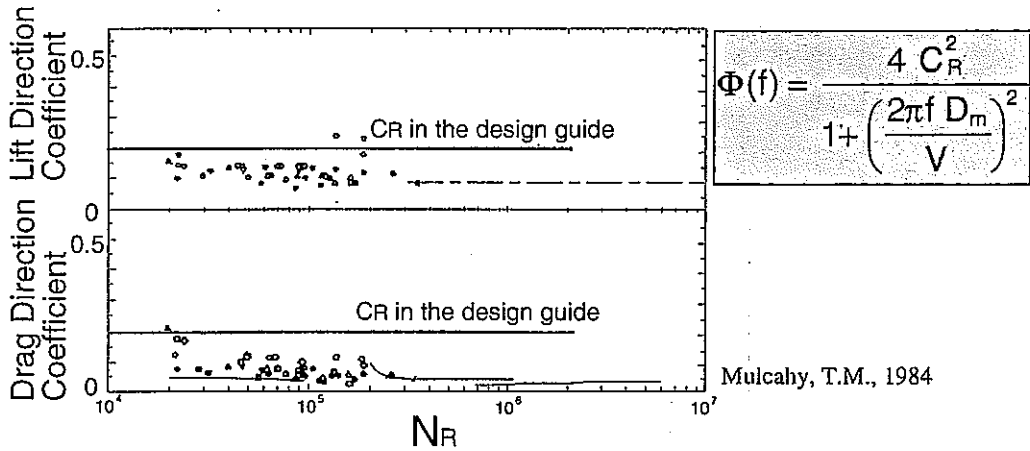


PNC/MONJU

9

## Coefficient for Fluid Force by Turbulence, $C_R$

---



PNC/MONJU

10

## Limit on Flow-induced Stress Amplitude

---

■  $K\sigma_V(x) \leq \sigma_F$

$K$ : Fatigue strength reduction factor  
(Stress concentration factor)

$\sigma_V(x)$ : Flow-induced nominal stress amplitude in well

$\sigma_F$ : Allowable fatigue limit for design

$$\sigma_V(x) = \sqrt{\sum_n \{\sigma_{L,n}^2(x) + \sigma_{D,n}^2(x) + \sigma_{R,n}^2(x)\}}$$

$\sigma_{L,n}(x)$ ,  $\sigma_{D,n}(x)$ : Nominal stress amplitude induced by vortex shedding  
L;Lift direction, D;Drag direction

$\sigma_{R,n}(x)$ : Non-directional random excited stress amplitude by turbulence

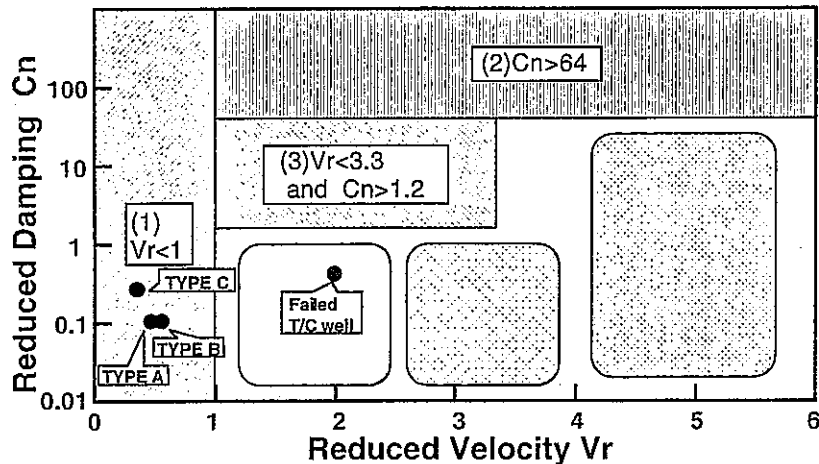
PNC/MONJU

11



## FIV Evaluation for the Modified Design

- Synchronized Vibrations can be avoided.



- Predicted Stress Amplitudes for the modified wells were less than the design fatigue limit.

PNC/MONJU

12

## Summary

- Modified designs of thermowells have been presented for those on the secondary cooling system piping in FBR Monju.
- The modified designs are based on a newly prepared design guide to prevent failure due to FIV.
- The design guide provides a high cycle fatigue evaluation procedure for stresses due to vortex-induced vibration and also random turbulent vibration in addition to criteria for avoidance and suppression of synchronized vibrations.
- As a result of the design study, each immersed length of three different thermowells was selected much shorter than that of the existing thermowells to satisfy the criteria in the design guide with enough margin, also satisfying the requirement for temperature measurement.
- Tapered shape is adopted for each modified well to avoid stress concentration.

PNC/MONJU

13

# Numerical Simulation

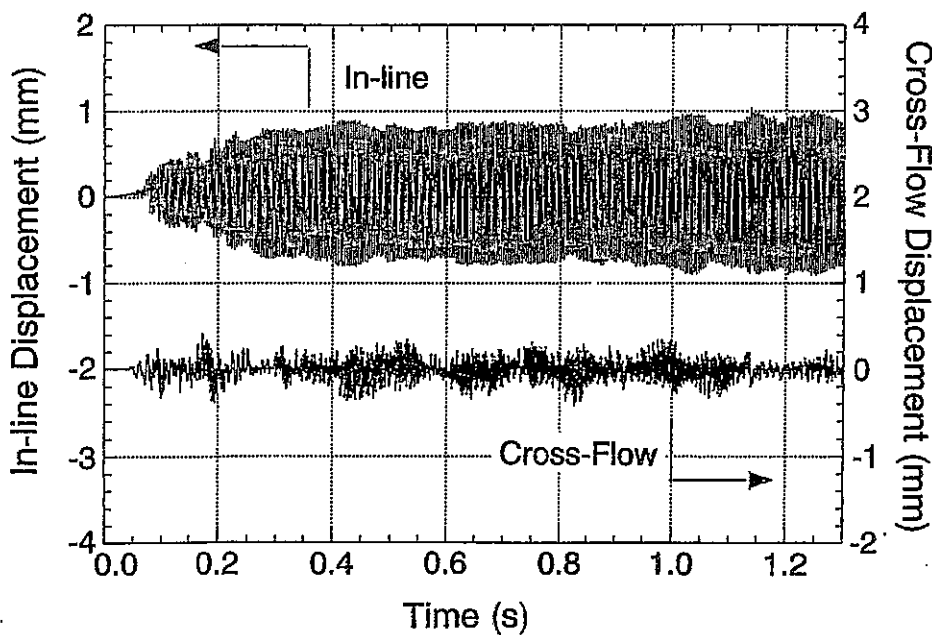
## ◆ Simulation code

*SPLASH code : 2-D fluid structure coupled model by ALE method*

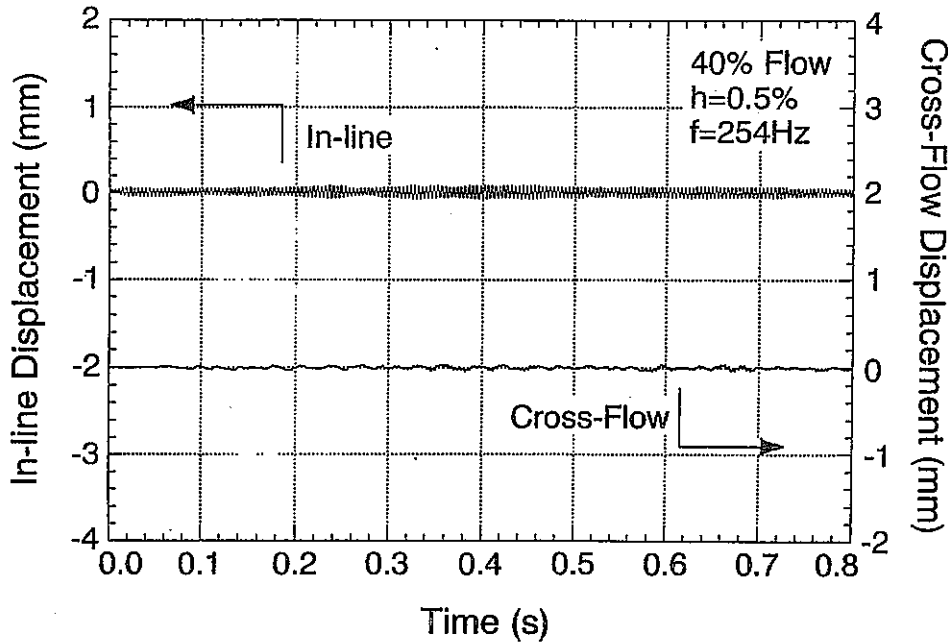
## ◆ Analysis of actual operating condition

- 100% flow rate (200 °C) : intact well
- 40% flow rate (485 °C) : intact well
- 40% flow rate (485 °C) : reduced natural frequency well

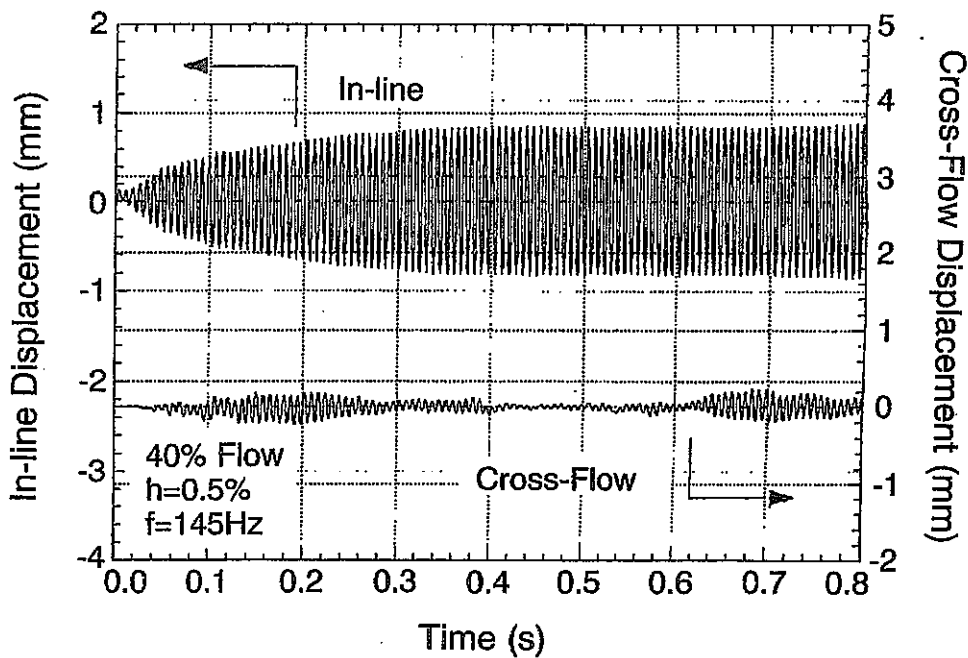
## Time history of the displacement response of the well



## ***Time history of the displacement response of the well at 40% flow***



## ***Time history of the displacement response of the well with reduced natural frequency at 40% flow***



## Conclusions

- ◆ *As a result of a water flow test, in-line vibration of the T/C well was measured which started at  $V_r \sim 1$  followed by a peak at  $V_r \sim 2$*
- ◆ *It was shown that the displacement response of the thermocouple well was represented by the reduced flow velocity for both result of natural frequency :  $f=110\text{Hz}$  &  $250\text{Hz}$ .*

## Conclusions(cont.)

- ◆ *Effects of several factors on in-line vibration was investigated by the test. And an insertion condition of T/C sheath was found to be influential on damping ratio and in-line vibration.*
- ◆ *Based on the water flow test and analysis, it was probable that in-line vibration occurred in the T/C well with the 100% flow rate and also with the 40% flow rate when the natural frequency of the well was reduced due to crack growth.*

*ASME/JSME PVP 98', 27-30 July 1998, San Diego*

**Object Oriented Design Procedure  
for Nuclear Components  
Against Thermal Transient Stress**



**Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation**

**N. Kasahara and M. Inoue**

## Objectives

---

**1. Analysis procedure of thermal transient stress is complicated one, which uses thermal -hydraulic codes, structural analysis codes, and strength evaluation codes.**



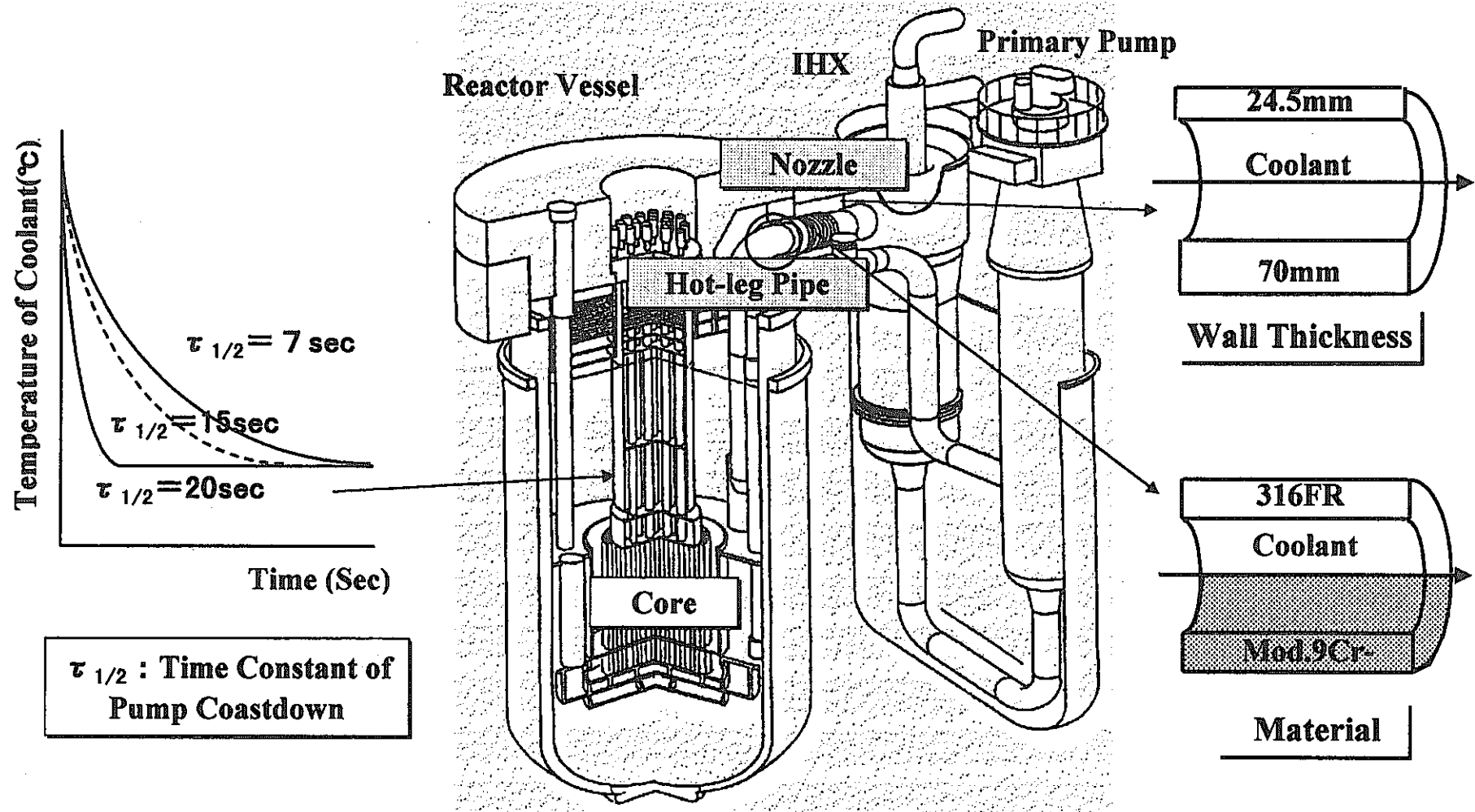
**Simplification by developing the total analysis system of thermal transient phenomena**

**2. Elevated temperature structural design codes tend to become complex from consideration of additional failure modes due to creep.**

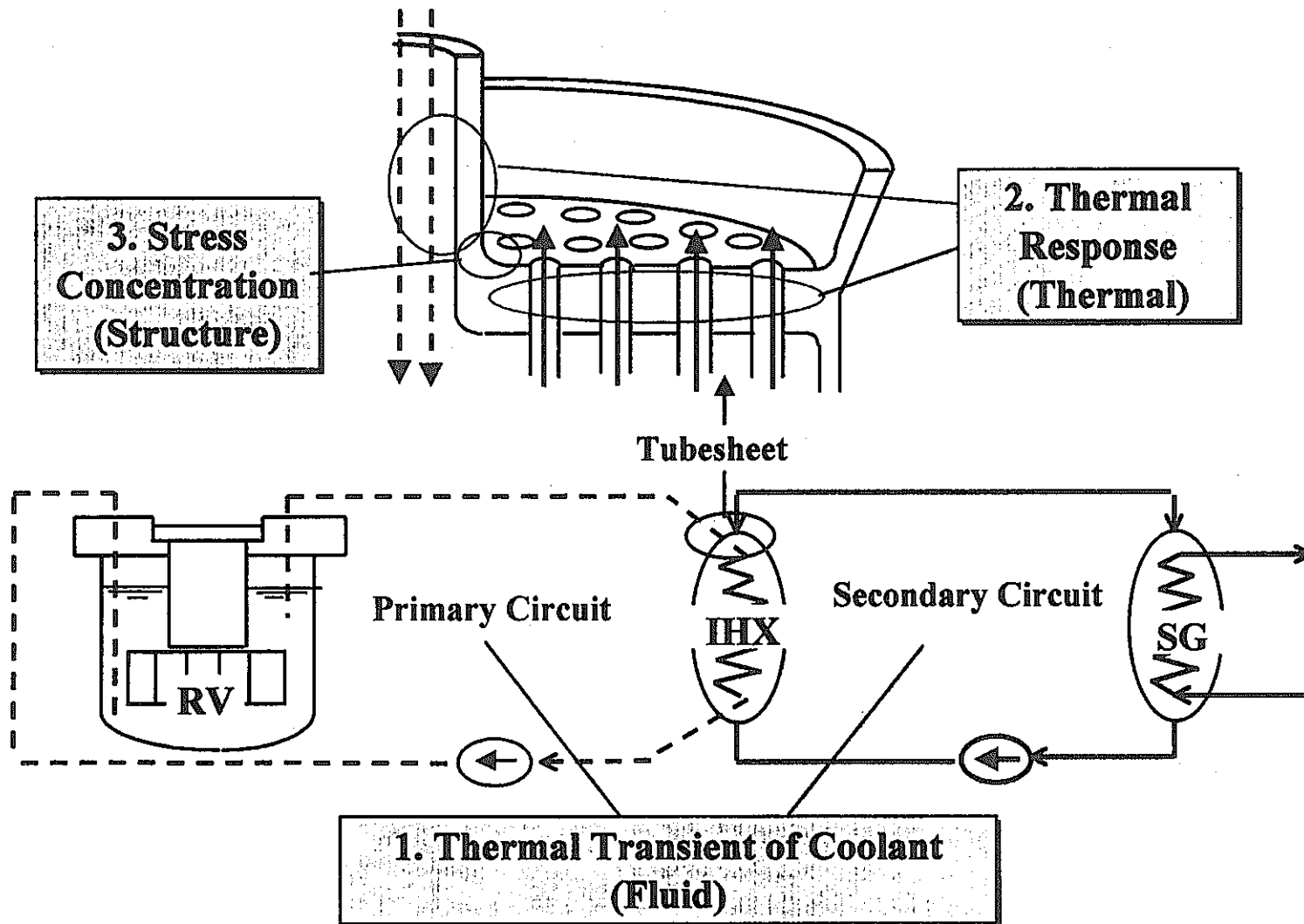


**Simplification by developing the strength evaluation program based on template concept**

# Example of Thermal Transient Problem in FBR Plant



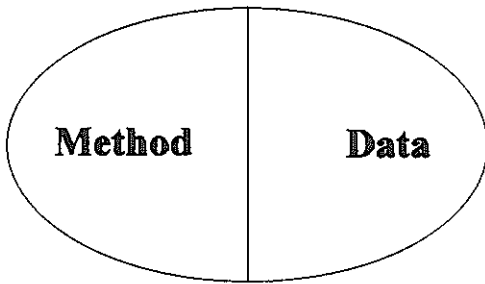
# Thermal transient phenomena in Fast Breeder Reactor Plants





# Object Oriented Approach for Large Scale Simulations

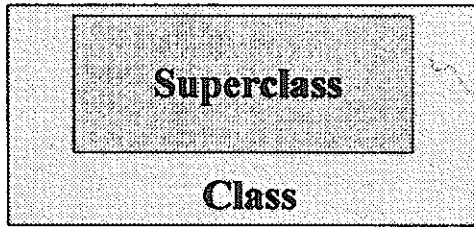
---



**Autonomous System**

**Software Parts**

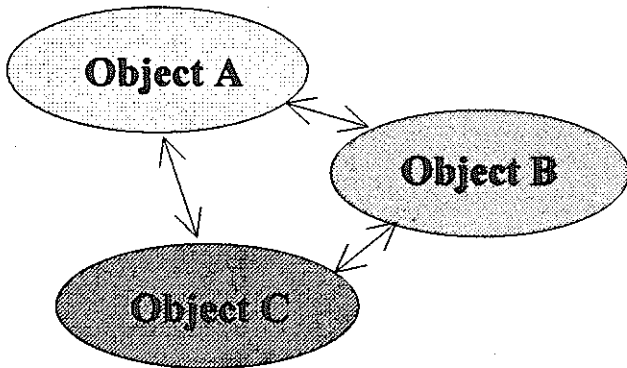
**(A) Encapsulation**



**Differential Programming**

**Hierarchical Structure**

**(B) Inheritance**

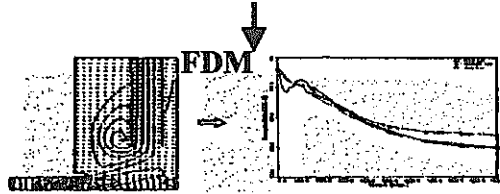
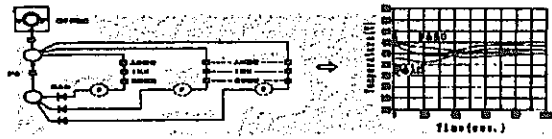


**Flexible Interface among Programs**

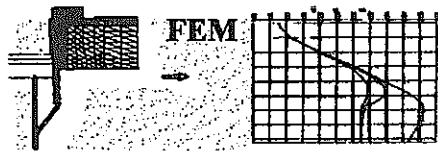
**Distributed Parallel System  
(Client/Server)**

**(C) Message Passing**

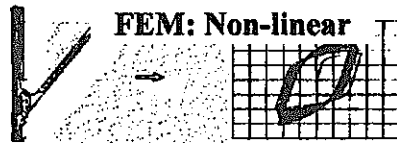
# Conventional Design Analysis Procedures for Thermal Transient Problem



Flow Rate & Temp at All Nodes

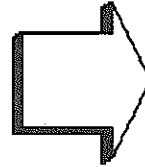


Temp at All Nodes



Stress & Strain at All Nodes

Strength Evaluation



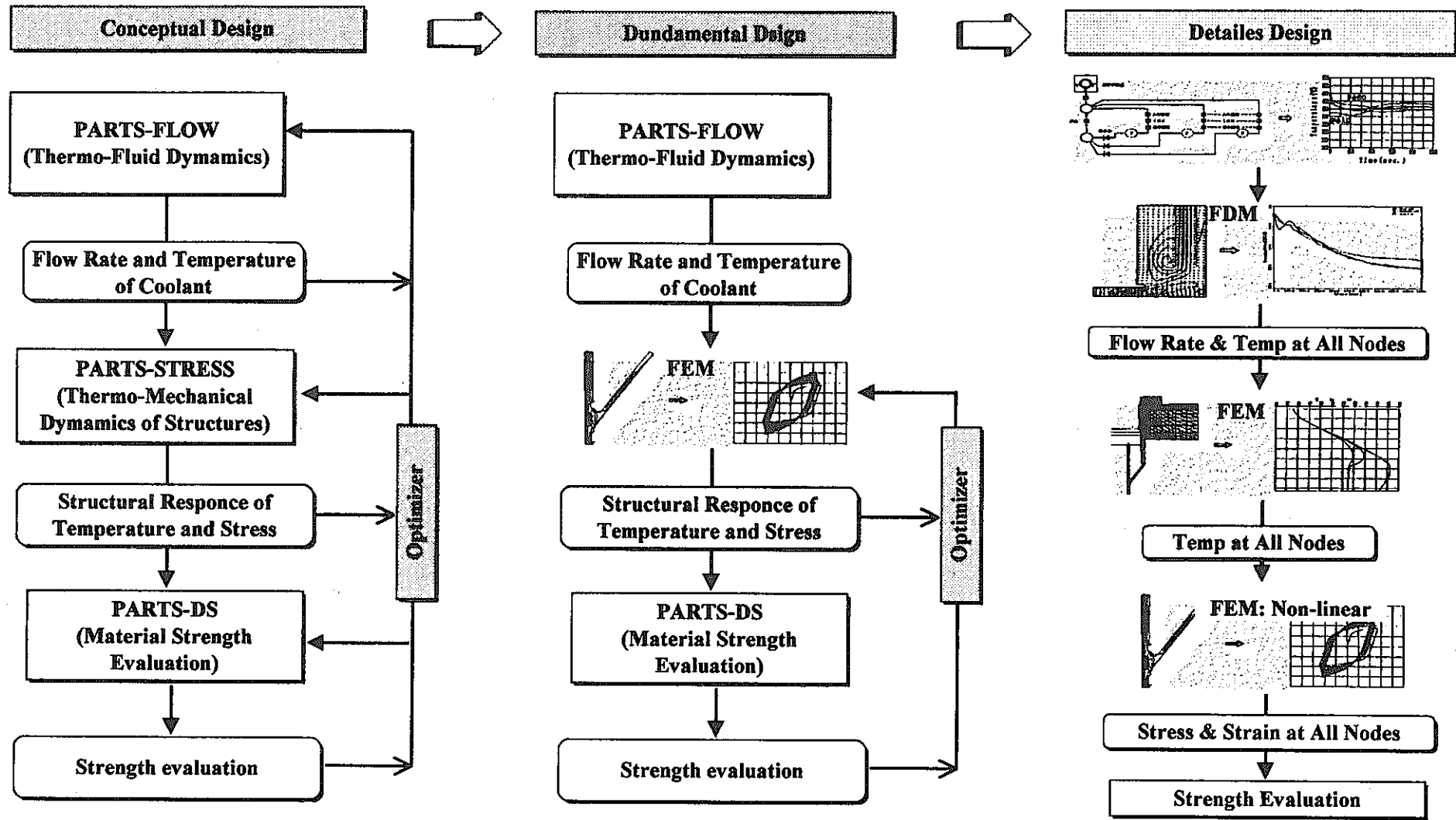
## Conventional Analysis Procedure : Sequential Engineering

1. Several Different Codes are utilized
2. Each code consumes computational power
3. Complicated Operations are requires to make interface
4. Monthes/Case is needed



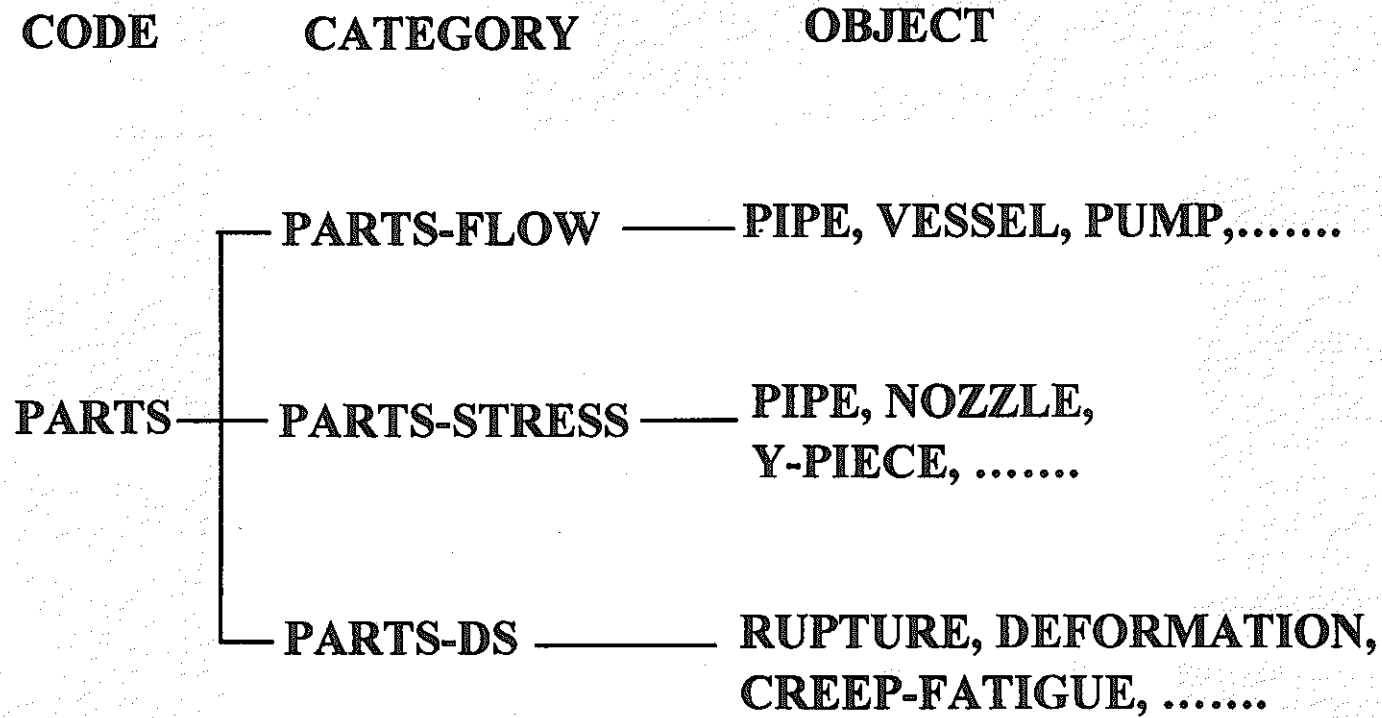
It remains Confirmation of provided design.

# Proposed Design Analysis Procedures for Thermal Transient Problem



# Structure of the PARTS code

---



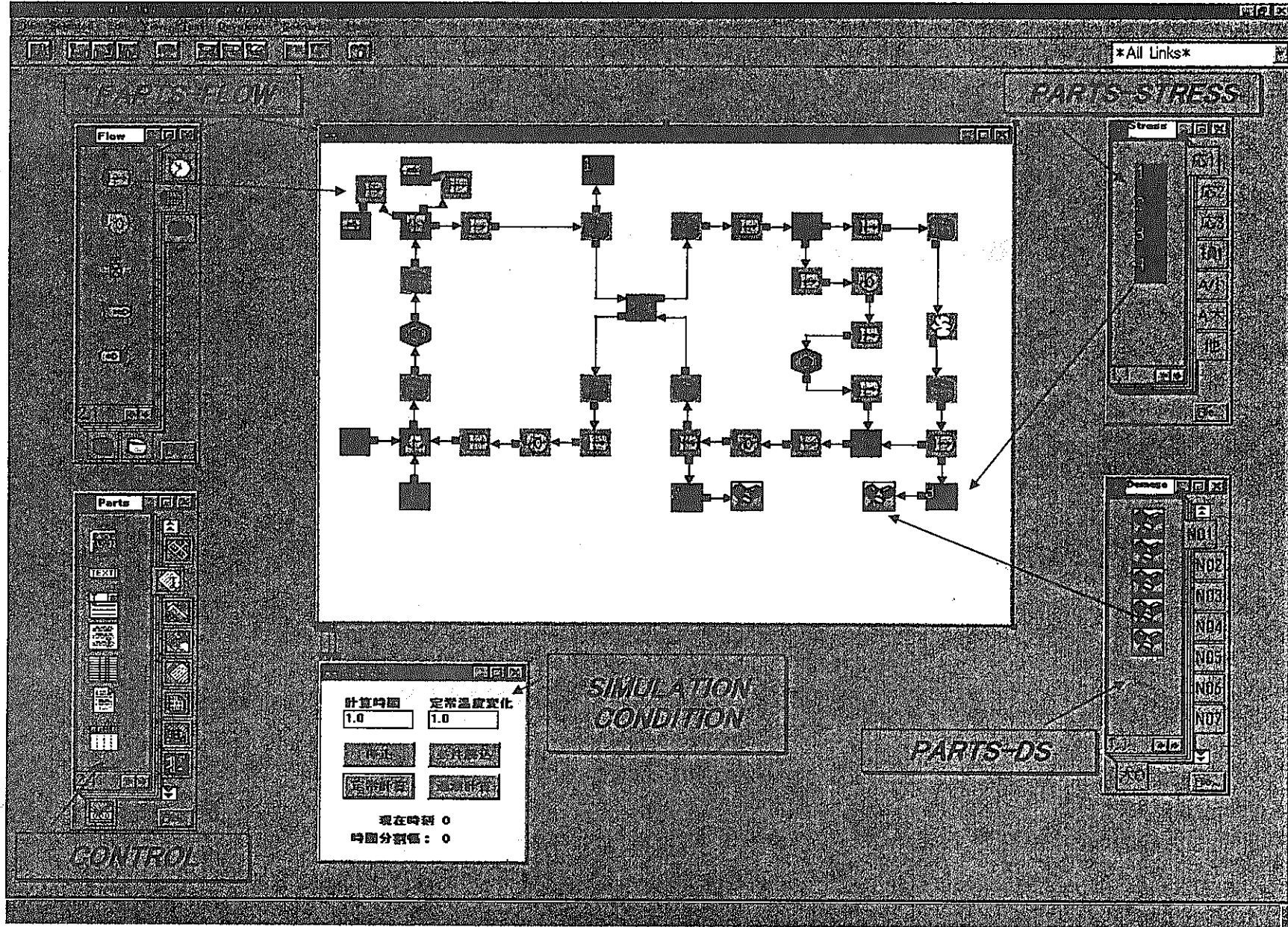
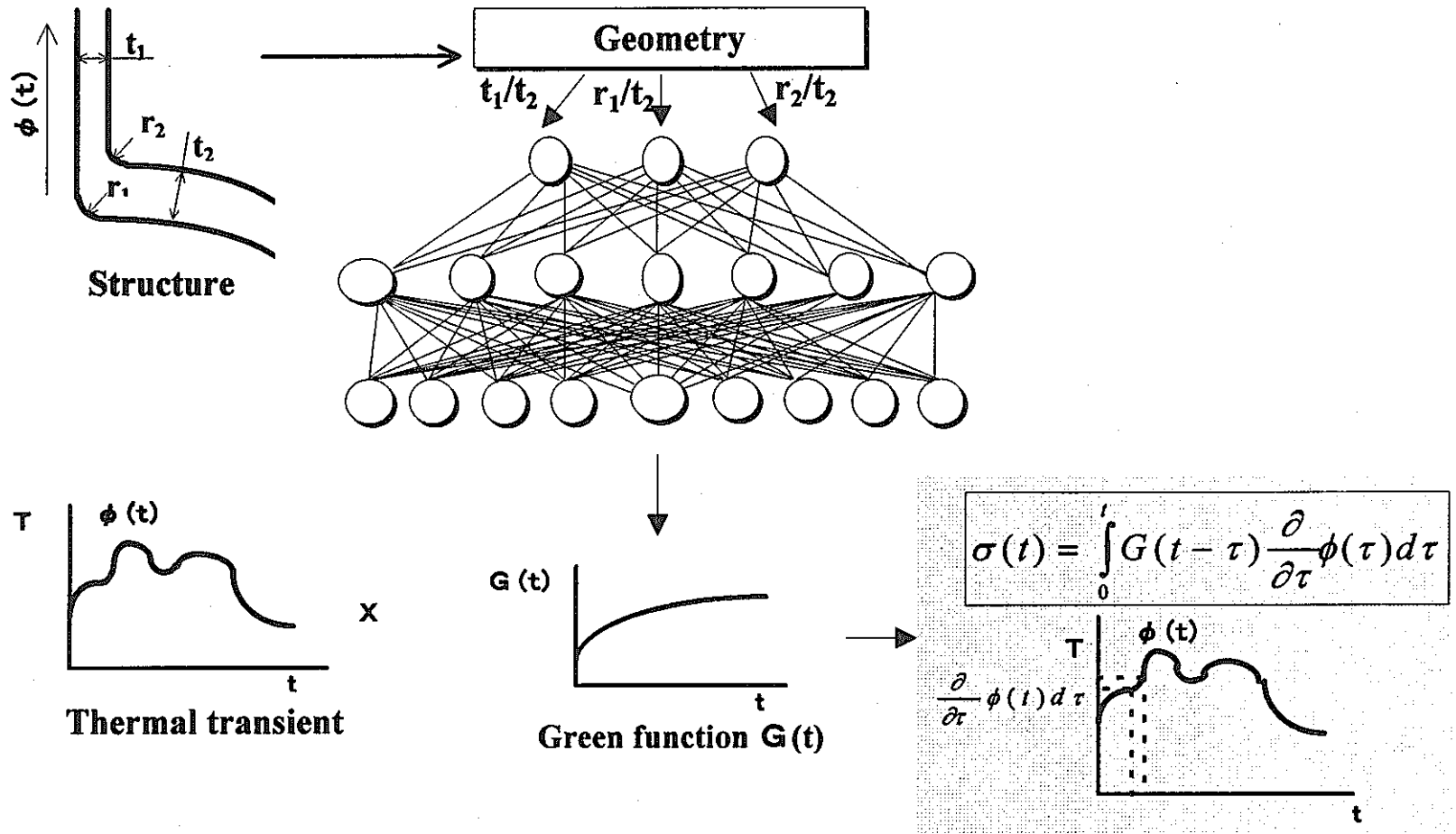
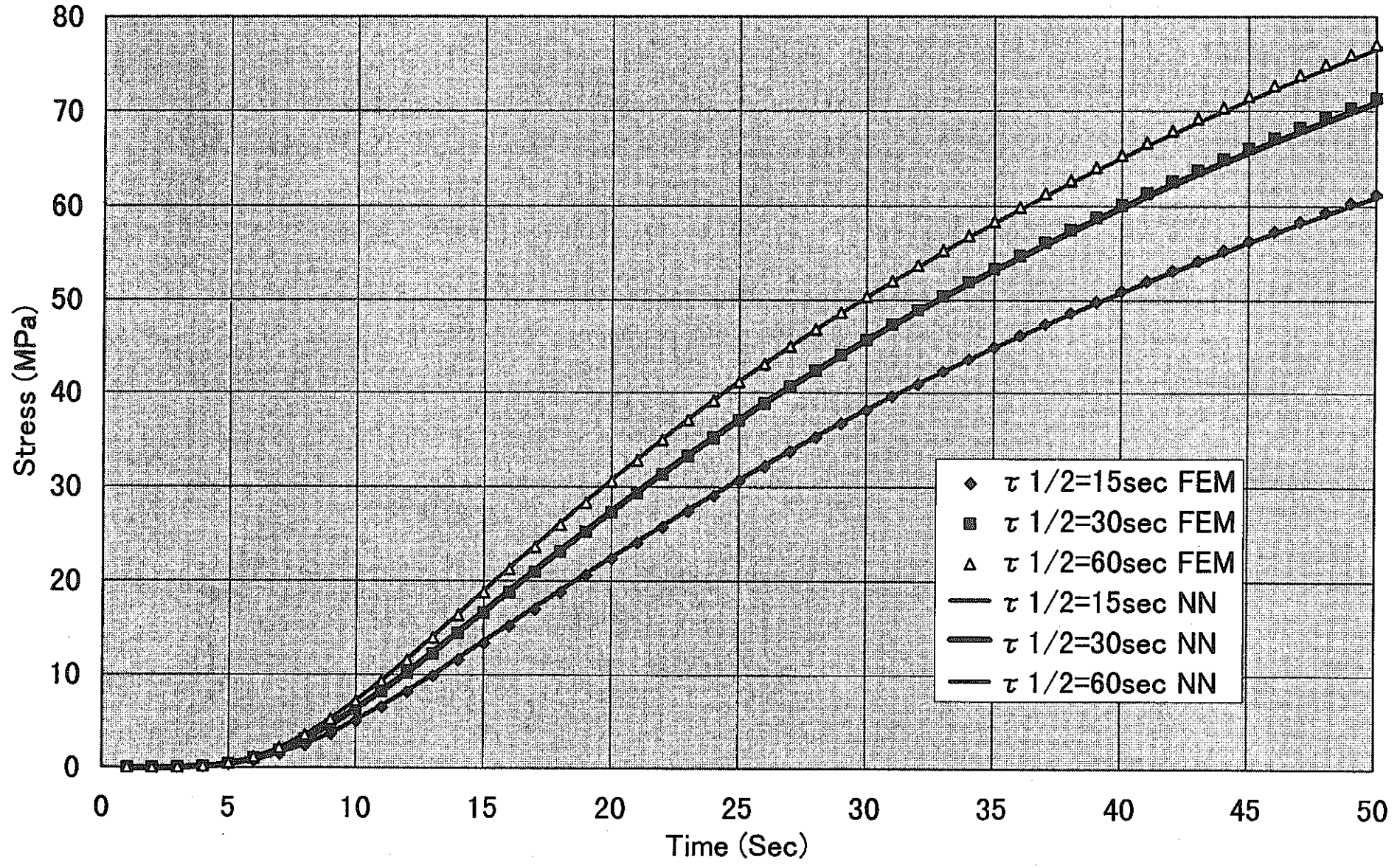


Fig. Graphical User Interface of a PARTS system

# Fast simulation of transient thermal stress based on Green Function predicted by Neural





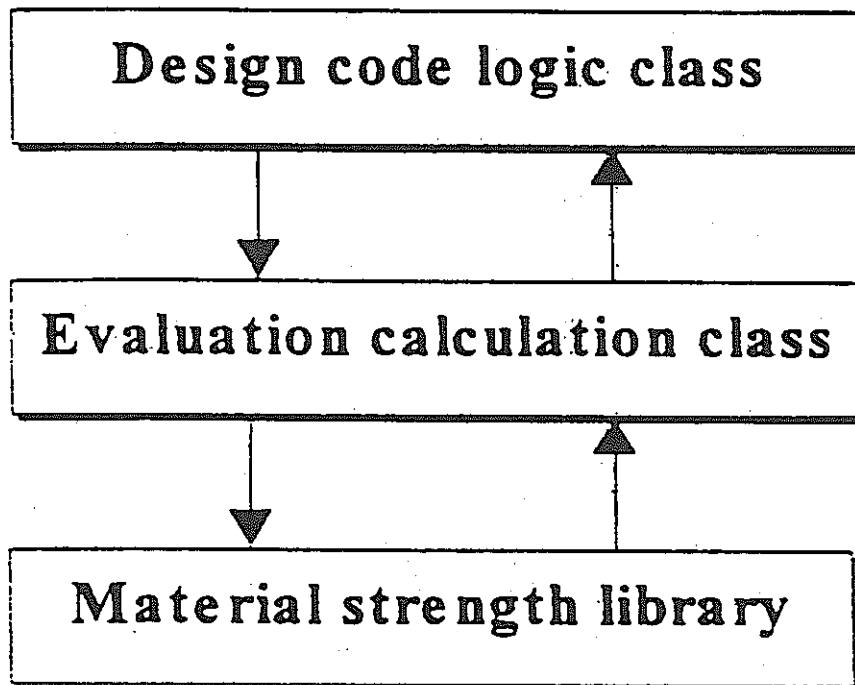
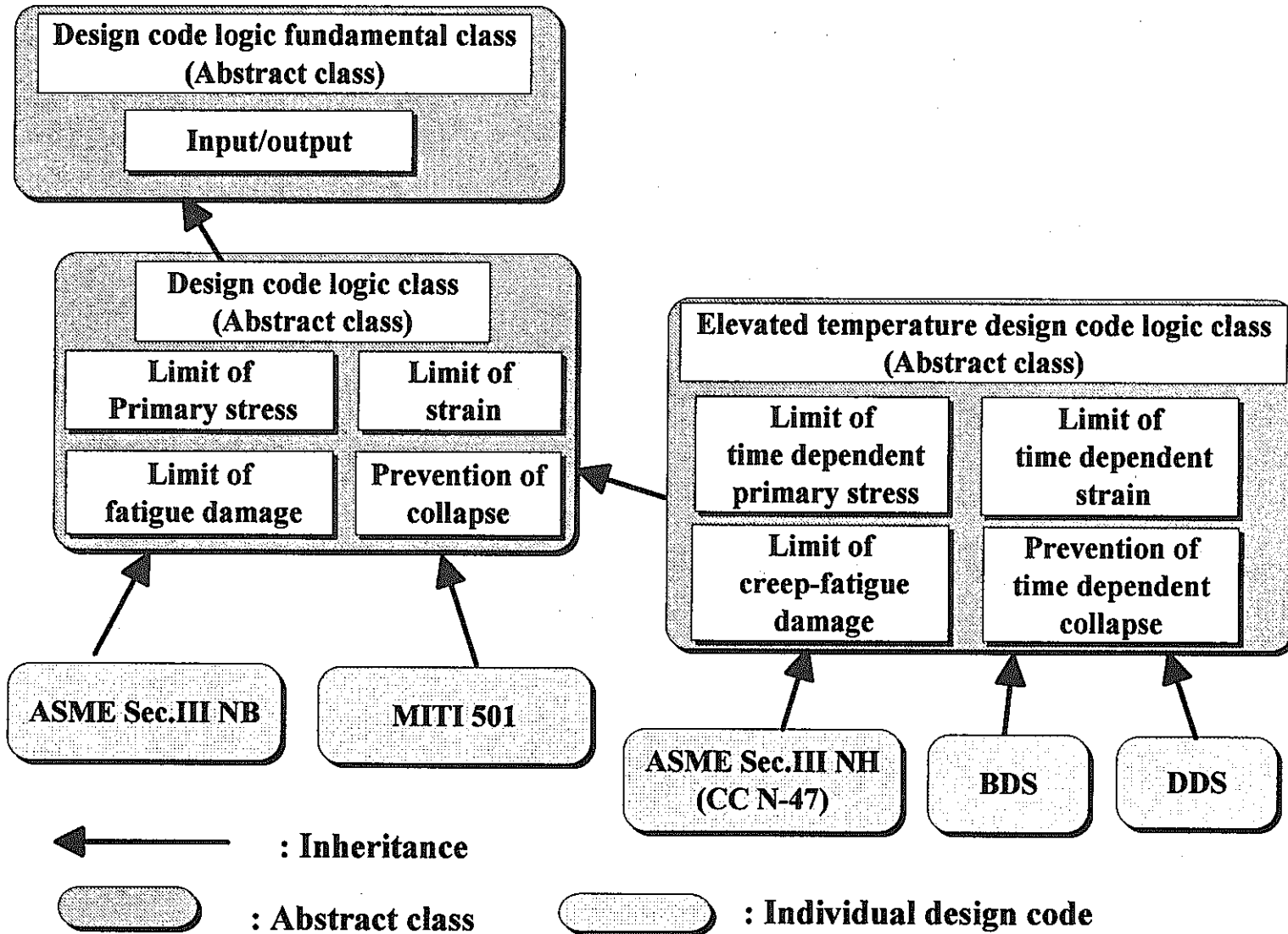


Fig.9 Strength evaluation program using hierarchical class libraries



# Class Library for design code in PARTS-DS



```

// Definition of Damage Calculation Class
class Sdamage
{
public:
    virtual void CalcDamage( void );
}

```

```

// Definition of Fatigue Damage Calculation Class
class SFatigue : public Sdamage
{
protected:
    virtual void CalcStrainRange( void );
    virtual void CalcFatigueDamage( void );
}

```

```

// Definition of Creep Damage Calculation Class
class SCreep : public Sdamage
{
protected:
    virtual void CalcInitialStress( void );
    virtual void CalcCreepDamage( void );
}

```

Fig.11 Evaluation calculation class of creep fatigue damage

*Fatigu(mat,temp,epd,epr,cnf,new),*  
*mat:material, temp:temperature, epd:strain rate,*  
*epr:strain range, cnf:failure cycle number,*  
*new: input epr and output cnf (new=0)*  
*input cnf and output epr (new=10)*

Fig.12 Function of fatigue curve in the material strength library

## Conclusions

---

**1. Analysis procedure of thermal transient stress was simplified by the object oriented total analysis code "PARTS", which can simulate both thermal-hydraulic dynamics and thermal-mechanical behaviors.**

**2. Strength evaluation program based on structural design codes was simplified by introducing hierarchical class libraries.**

1998 ASME/JSME JOINT PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE

SESSION 1.3L (DA-09A)  
Monday, July 27 (Harbor Island 2)

JNC TN9200 98-001

**An Evaluation Method of Elastic Follow-up Behavior of  
Piping Systems Containing Bellows Expansion Joints**

**K. Tsukimori**

Oarai Engineering Center  
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Japan

## OBJECTIVE

To develop analysis method for elastic follow-up behaviors of piping systems with bellows expansion joints.

- \* suited for parameters survey in design;  
simple and easy to consider bellows configuration
- \* FEM analyses; time consuming since bellows configuration is complex
- \* existing studies; most of them are on the piping systems with elbows

## BASIC PATTERNS

\*simple Z-shaped piping systems subjected to thermal loading (Fig. 1)

(a) without bellows expansion joints:

(b) with two hinge type joints: *elastic follow-up between ends*

(c) with three hinge type joints: *almost stable*

(d) with four hinge type joints: *elastic follow-up between bellows*

\* maximum thermal stress in pipe; (a) > (b) >> [(c), (d)]  $\doteq 0$

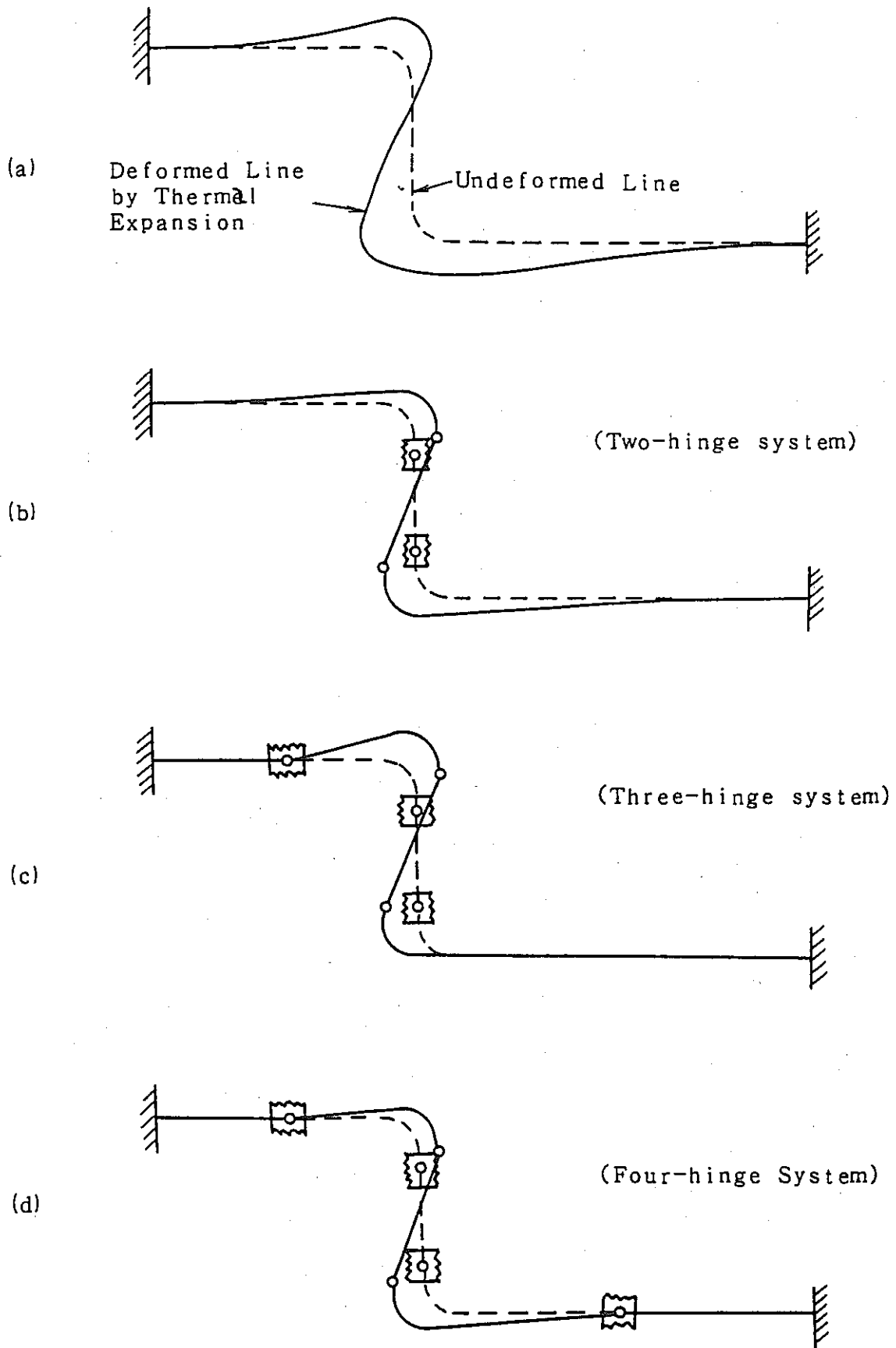


Fig. 1 Mitigation of thermal stresses in Z-shaped piping system by expansion joints



**SIMPLE MODEL (for reference)**

\* Threshold of bending moment is assumed to evaluate final deformation.

\* example ; simple piping system model (Fig.2)

*formulation;*

$$\gamma = \frac{\theta_{1c}}{\theta_1} = 1 + \alpha^2 (1 - \alpha\kappa)\xi \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$$

where  $\alpha = \frac{L_2}{L}, \quad \xi = \frac{k_{\theta 1}}{k_{\theta 2}}$

$$M_1 = k_{\theta 1} \theta_1 = LP$$

$$M_{1c} = \kappa M_2 = \kappa k_{\theta 2} \theta_2 = LP_c$$

$$M_2 = k_{\theta 2} \theta_2 = L_2 P$$

$$M_{2c} = k_{\theta 2} \theta_{2c} = L_2 P_c$$

$$\delta = L \theta_1 + L_2 \theta_2 = L \theta_{1c} + L_2 \theta_{2c}$$

example;

$$\gamma = 1.125 \quad (\alpha = 0.5, \xi = 1, \kappa = 1)$$

$$\gamma = 1.25 \quad (\alpha = 0.5, \xi = 1, \kappa = 0)$$

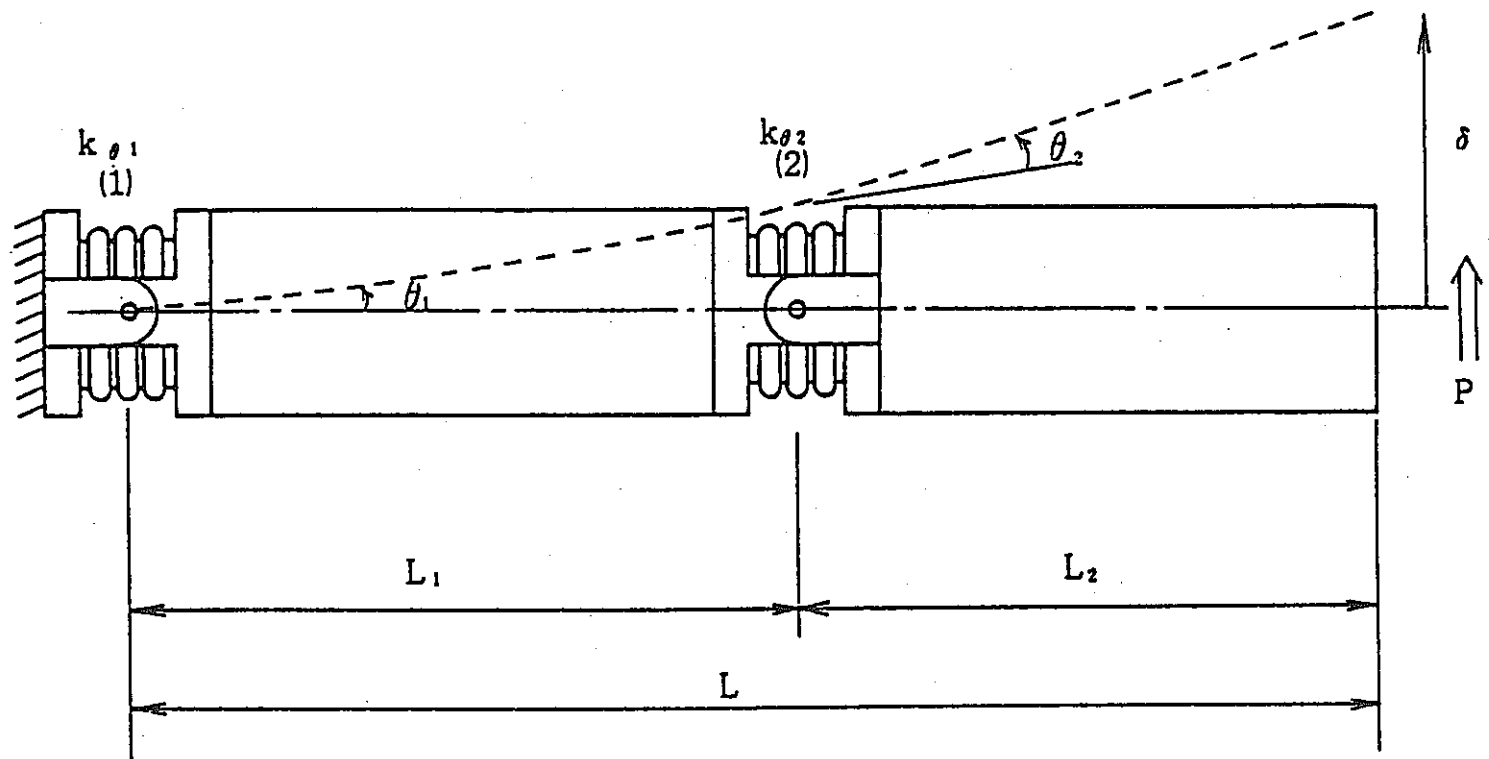


Fig. 2 Elastic follow-up between two bellows

## PRESENT METHOD(1/2)

### *Basic flow of the model;*

1. Evaluation of *initial bending moments* and *initial angular displacements* of bellows by thermal elastic analysis of the piping system assuming that bellows expansion joints are rotational springs.
2. Evaluation of *parameter 'β'* which is related to elastic follow-up behavior by setting different bending rigidities of bellows which is to reveal creep behavior in the piping system. (Fig. 3)
3. Application of the *equation of bending moment of bellows in creep region* (developed by Tsukimori(1996)) to the previous relation between bending moment and angular displacement.

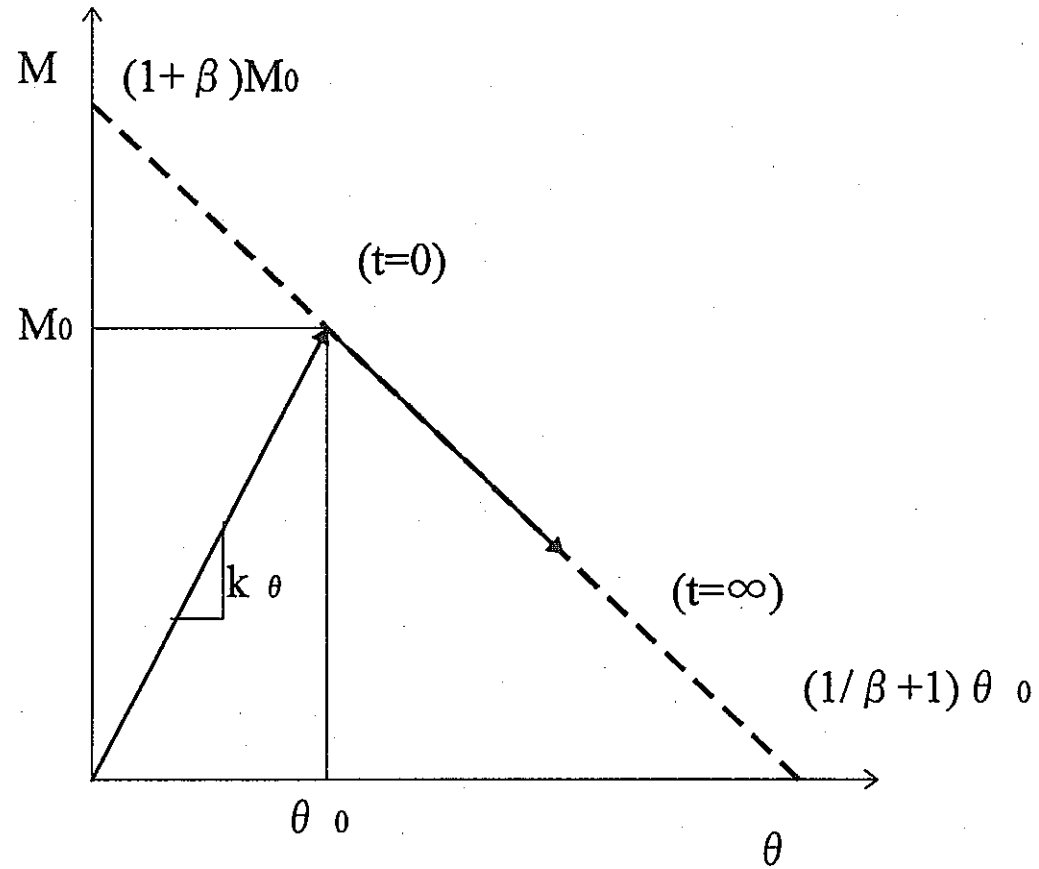


Fig. 3 Bending moment vs Angular displacement  
(Elastic follow-up behavior of bellows expansion joint)

## PRESENT METHOD(2/2)

*formulation;*

$$M = M_0 \left( 1 + \beta - \frac{\beta \theta}{\theta_0} \right) \quad (4-1) \text{ (Fig. 3)}$$

$$M = -\Re \left| \frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} \right|^{1/n} \operatorname{sgn} \frac{d^2 \dot{w}}{dx^2} \quad (\text{by Tsukimori(1996)})$$

where

$$\Re = \frac{d_p^2}{2} \left( \frac{d_p q}{8 \mathfrak{S} k} \right)^{1/n} \int_0^\pi (\sin \varphi)^{\frac{n+1}{n}} d\varphi$$

$$\mathfrak{S} = \left( \frac{q}{4} \right)^2 \frac{J_{n,1}}{[I_n(\kappa_0)]^n} + \frac{q}{4} \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right) \frac{J_{n,0}}{[I_n(\kappa_0)]^n} + \left( \frac{H}{2} - \frac{q}{4} \right)^{n+2} \frac{1}{(n+2)[I_n(0)]^n} \quad \left( \kappa_0 = \frac{4}{q} \right)$$

$$[I_n(\kappa_0)] = \int_{-h/2}^{h/2} \left| \frac{\eta}{1 + \kappa_0 \eta} \right|^{1/n} |\eta| d\eta$$

$$J_{n,m} = \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{H}{2} - \frac{q}{4} (1 - \cos \varphi) \right\}^n \cos^m \varphi d\varphi$$

(m=0, 1)

$$\dot{\epsilon} = k\sigma^n \quad \text{(Norton's law for creep)}$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} \leq 0 \quad \frac{dM}{dx} = 0 \quad \text{(constant curvature)}$$

$$\left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=l} - \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = -\dot{\theta} \quad \text{(B. C.)}$$

Consequently,

$$\dot{\theta} = \aleph M^n \quad \text{(4-11)} \quad \text{where} \quad \aleph = \mathfrak{K}^{-n} l$$

Substituting eqn.(4-1) to eqn.(4-11),

$$\dot{\theta} = \aleph M_0^n \left(\frac{\beta}{\theta_0}\right)^n \left(\frac{1+\beta}{\beta} \theta_0 - \theta\right)^n \quad \text{(4-13)}$$

The solution of this equation is

$$\gamma = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{1}{\beta} + 1 - \frac{1}{\beta \left\{ 1 + \frac{(n-1)\aleph \beta M_0^n}{\theta_0} t \right\}^{\frac{1}{n+1}}}, \quad \theta = \theta_0 \quad (t = 0)$$

**SAMPLE CALCULATION (Fig. 2)**

*-bellows spring constants:*  $k_{\theta 1} = k_{\theta 2} = 7.95 \times 10^6 \text{ kgmm} / \text{rad}$

*-pipe length :*  $L_1 = L_2 = L/2 = 5.0 \times 10^3 \text{ mm}$

$d_p = 1160 \text{ mm}, \quad q = 50 \text{ mm}, \quad H = 60 \text{ mm},$

*-bellows dimensions:*  $h = 1.95 \text{ mm}, \quad l = 700 \text{ mm}$

*-lateral displacement at the end:*  $\delta = 50 \text{ mm}$

*-initial bending moment:*  $M_{10} = 2M_{20} = 3.18 \times 10^4 \text{ kgmm}$

*-initial angular displacements:*  $\theta_{10} = 2\theta_{20} = 4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$

*-parameter  $\beta$ :*  $\beta = \frac{L\theta_{10}}{\delta - L\theta_{10}} = 4$

*-duration time:*  $t; \quad 0 \sim 2.0 \times 10^5 \text{ hr}$

*-parameters of Norton's Law ( $k, n$ ):* case1;  $(1.024 \times 10^{-9}, \quad 2.05)$

case2;  $(4.151 \times 10^{-9}, \quad 2.05), \quad \text{case3; } (1.024 \times 10^{-9}, \quad 3.05)$

case4;  $(8.358 \times 10^{-9}, \quad 2.05), \quad \text{case5; } (1.024 \times 10^{-9}, \quad 3.45)$

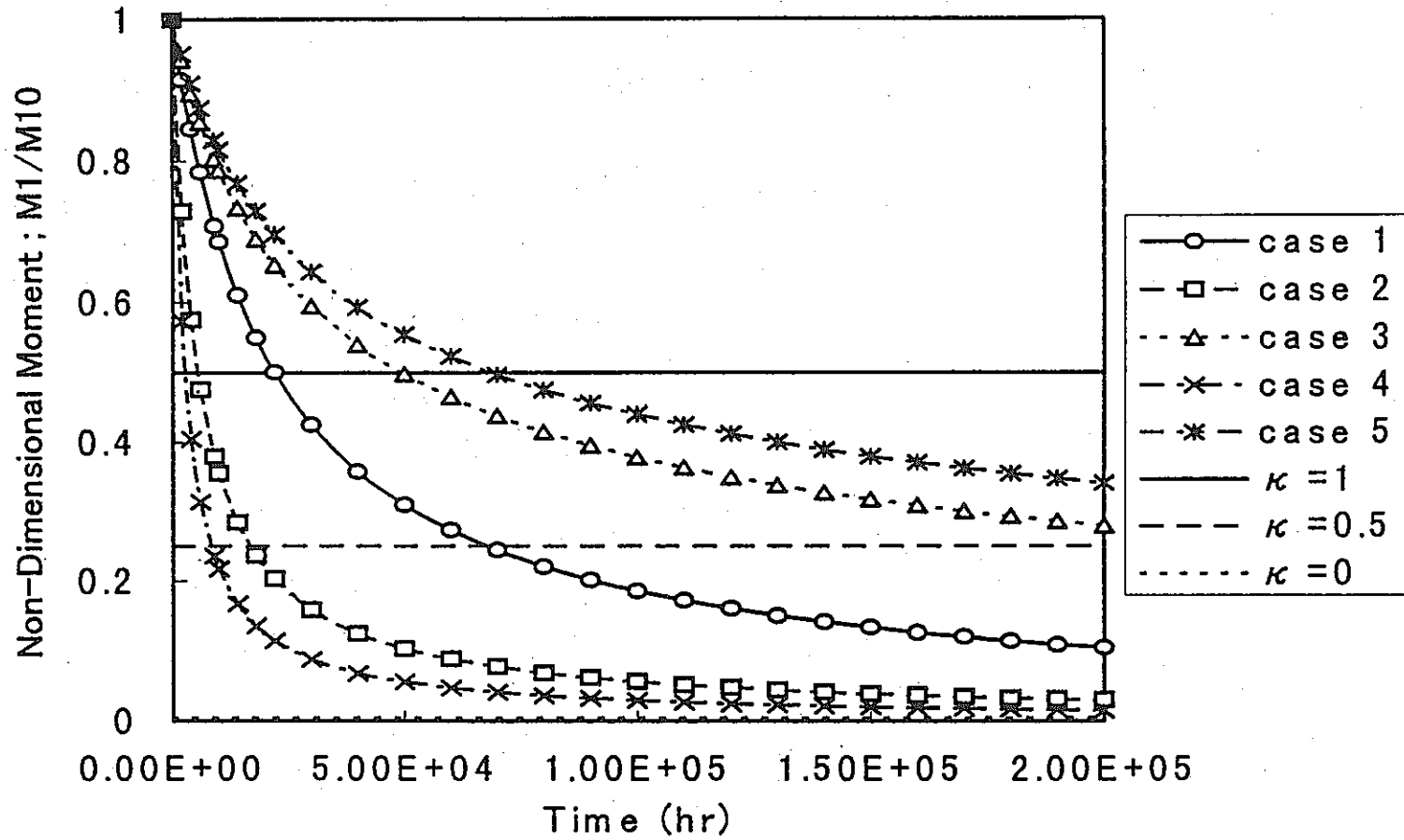


Fig. 4(a) Time vs Bending moment of bellows



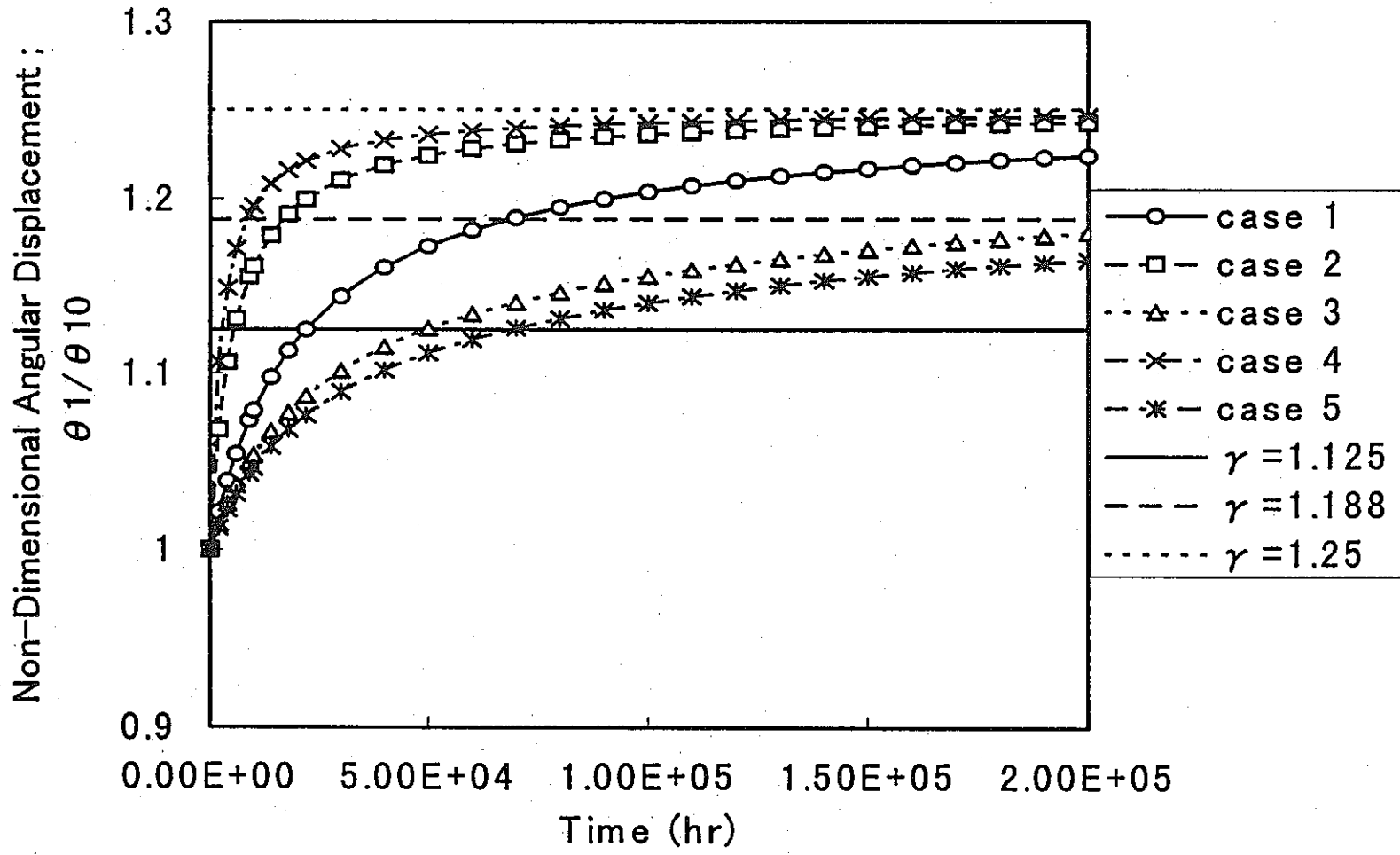


Fig. 4(b) Time vs Angular displacement of bellows

## DISCUSSION

- \* Present theoretical model can trace time dependent elastic follow-up behaviors while the simple model cannot.
- \* The initial bending moment level and the dimensions of bellows are considered explicitly.
- \* Creep characteristics of the bellows material are dealt with as the form of Norton's law.
- \* Present method is simple and convenient compared with the time consuming detailed finite element analyses.
- \* Present method is useful especially for parameter survey in the design of piping systems.

## CONCLUSION

- \* The characteristics of elastic follow-up of piping systems with bellows expansion joints were discussed.
- \* An evaluation method of elastic follow-up behaviors of piping systems with bellows expansion joints was proposed.
- \* The validity of this method was discussed through a simple example compared with the simple model which assumes the threshold of moment.

### *Future improvement;*

- \* Rationalization by decomposing angular displacement to elastic and creep elements.
- \* Development as a specific finite element (bellows expansion joint element) for general piping system analyses by FEM.

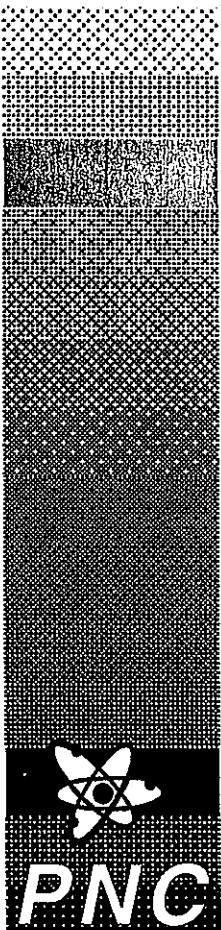
Presented at "1998 ASME / JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference"  
held at Sheraton San Diego Hotel and Marina, San Diego, California, July 26 - 30, 1998

JNC TN9200 98-001

# Numerical Analysis of Non-Stationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System

by Toshiharu MURAMATSU

Thermal-Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division  
O-arai Engineering Center  
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
Japan



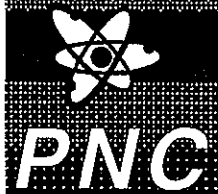
# Background and Objectives

## Background

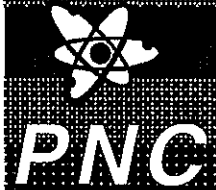
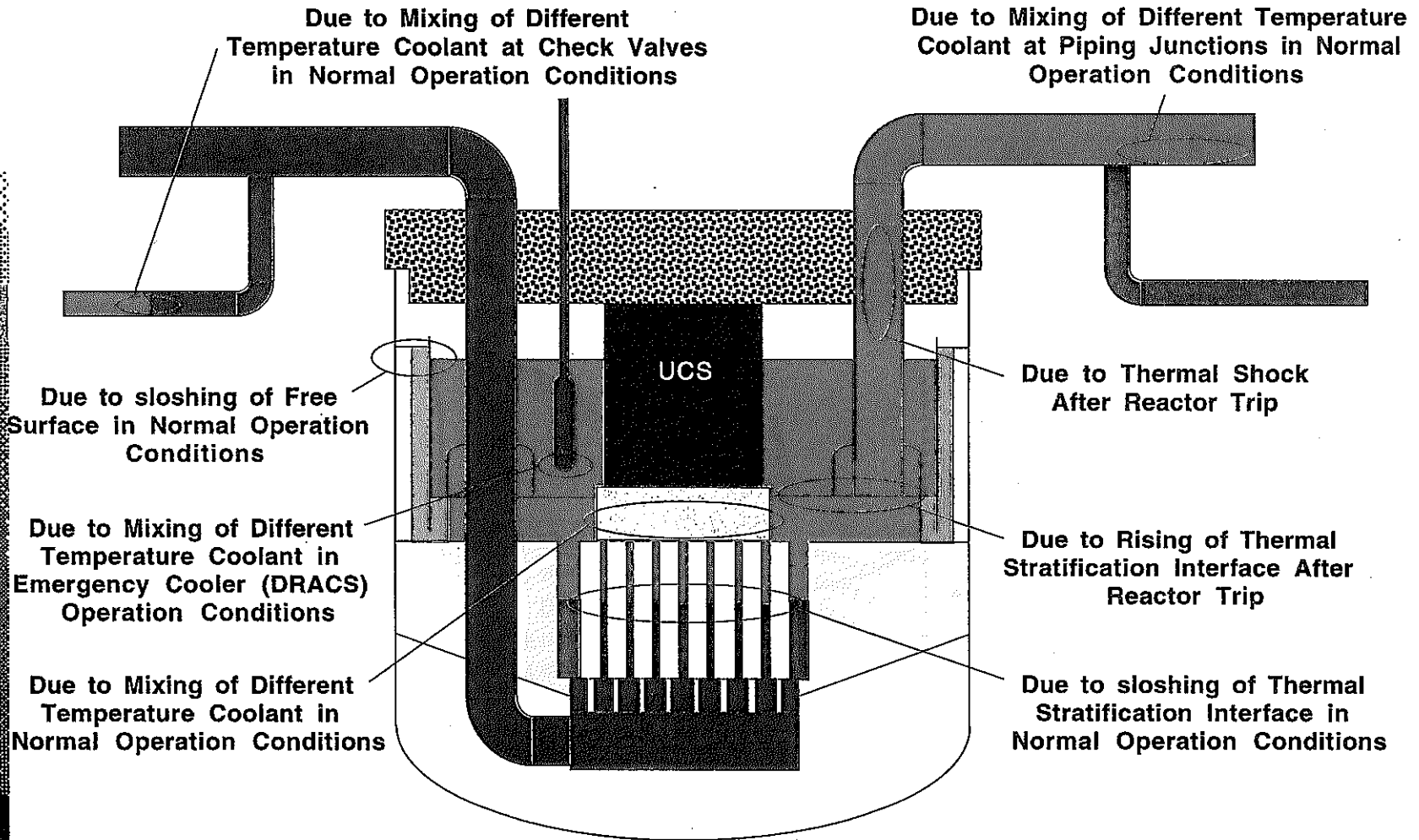
- Occurrence of High-Cycle Thermal Fatigue Due to Interactions of Cold and Hot Sodium Flows in the Fast Breeder Reactor Components, Namely Thermal Striping.
- Thermal Striping Phenomena Characterized by Non-Stationary Random Temperature Fluctuations with Dependence of Geometries.
- Use Numerical Methods Instead of Experimental Approaches for the Evaluation of Thermal Striping Phenomena.
- Finish the Developments and Verifications for Each Numerical Method.

## Objectives

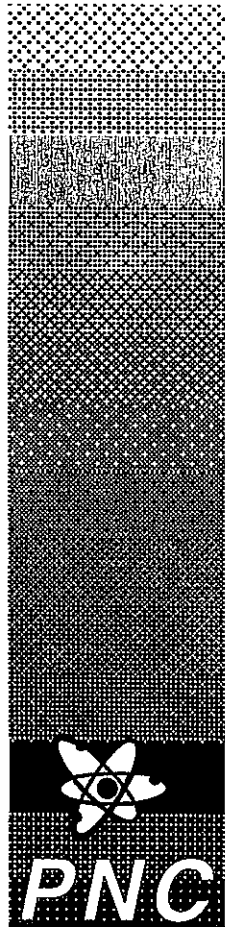
- Understanding of Non-Stationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System Simulating Thermal Striping Phenomena.
- Detailed Validation of Numerical Methods for the Thermal Striping Fluid - Structure Interaction Phenomena with a Fundamental Sodium Experiment.



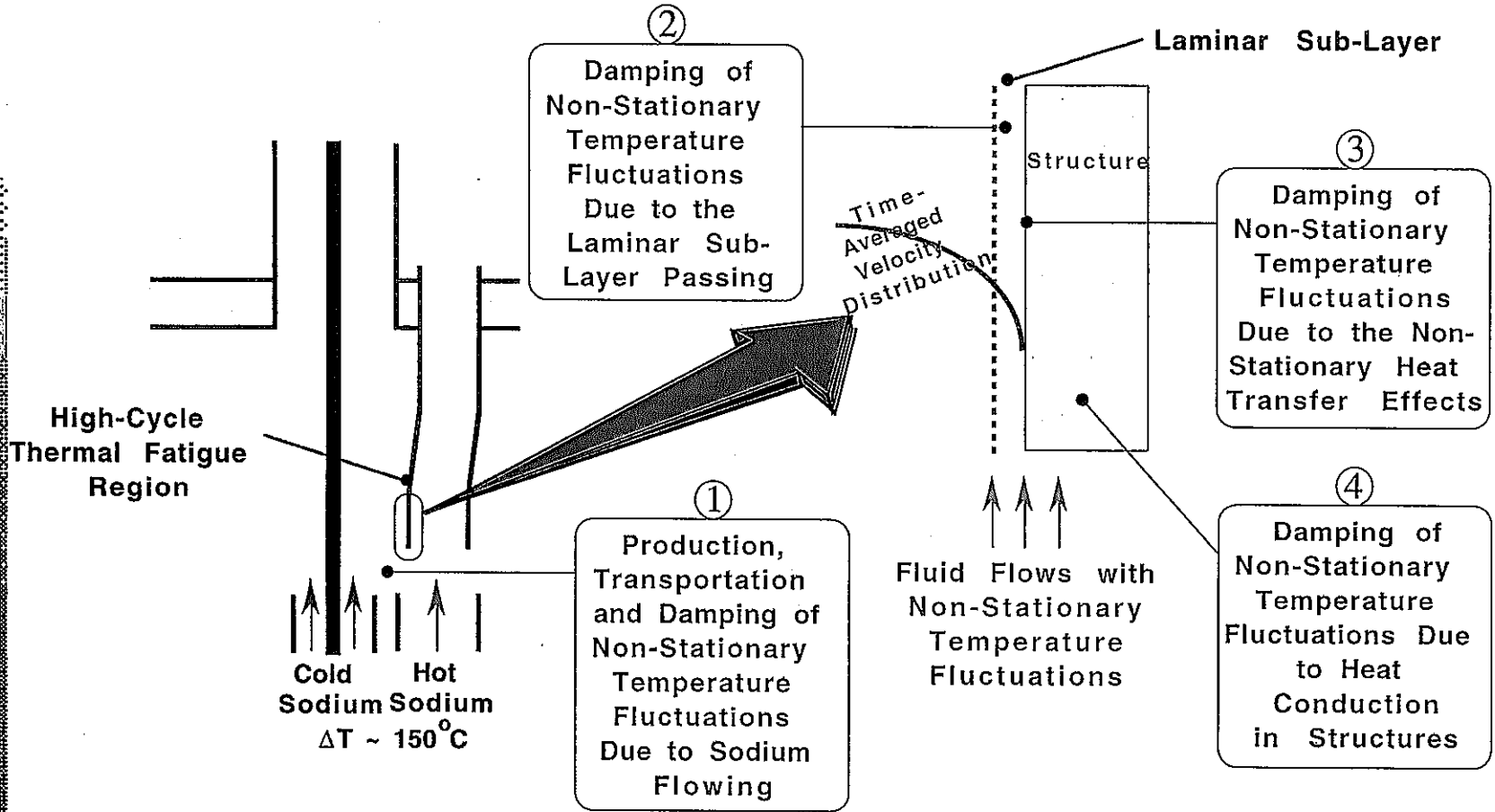
# Fluid - Structure Thermal Interactions in an LMFBR Plant



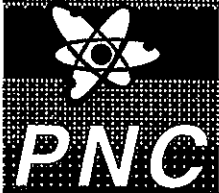
# Mechanism of Thermal Striping Phenomena



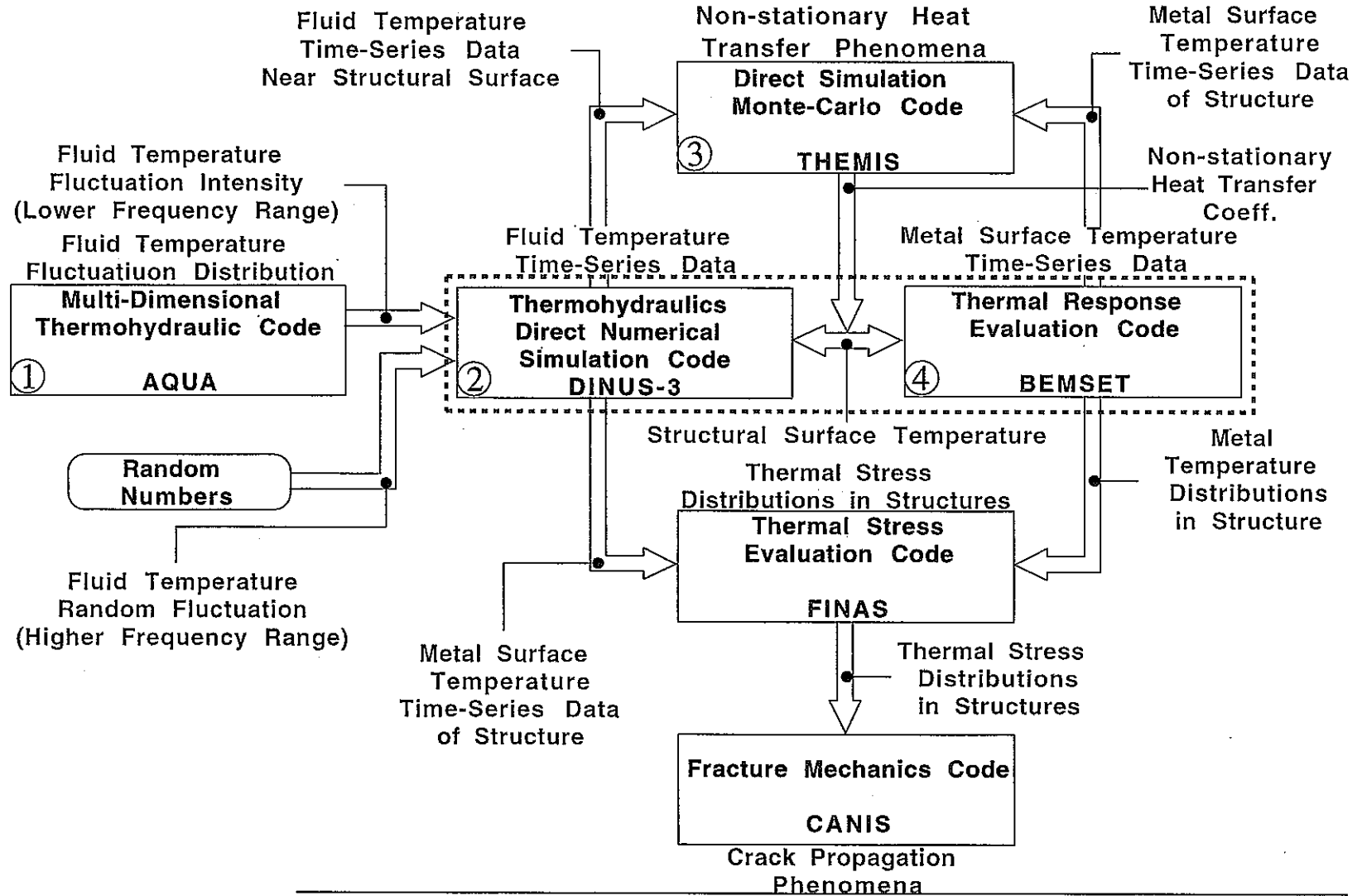
— 106 —



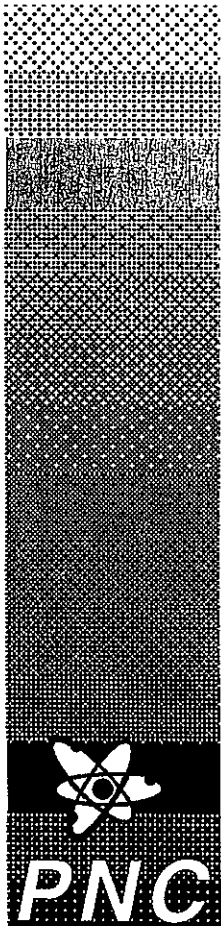
Typical Region of Thermal Striping Phenomena (UCS Bottom Domain)



# Thermal Stripping Evaluation System Based on Numerical Methods



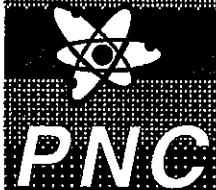
Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center



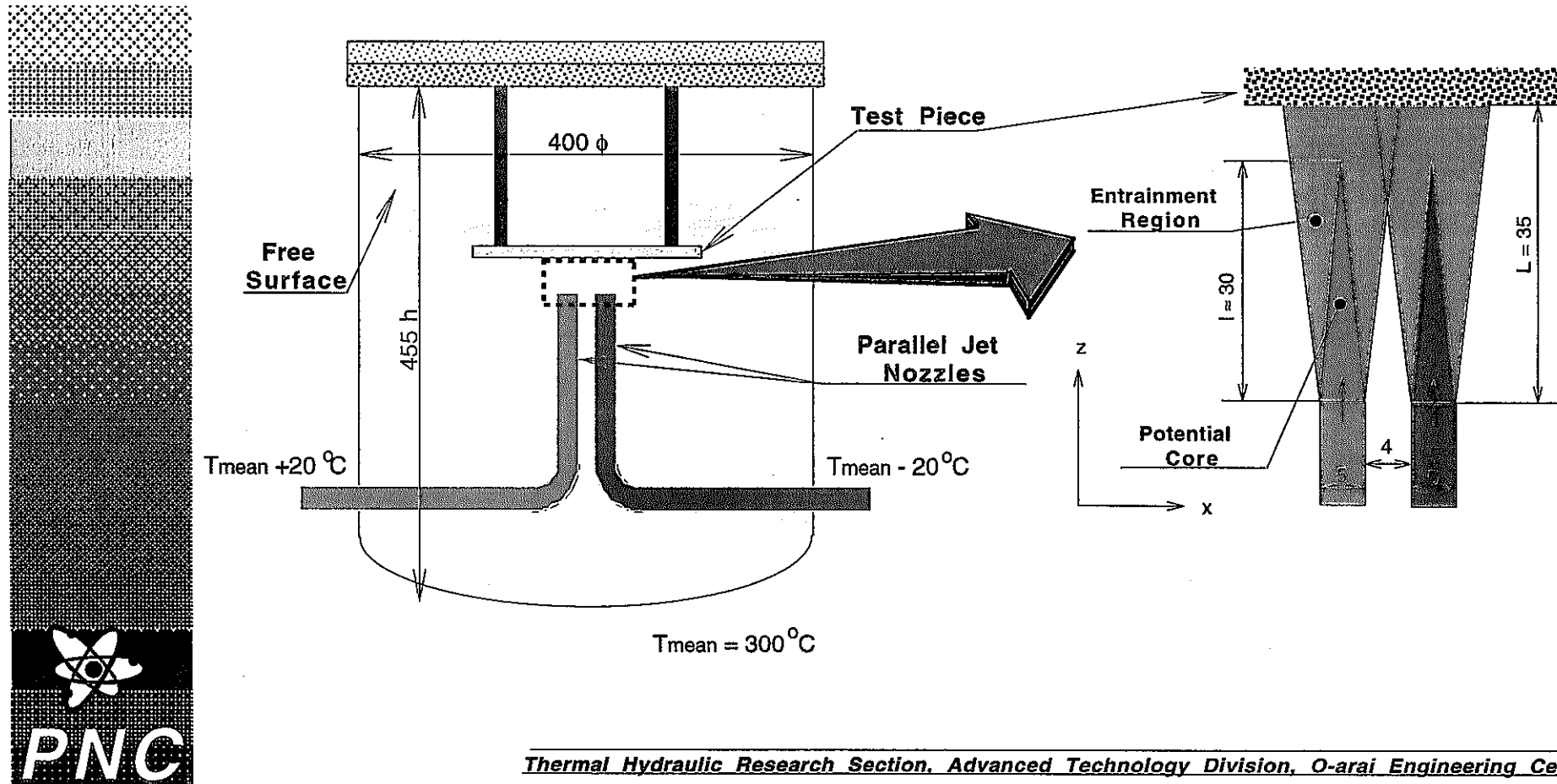


# Main Features of Computer Codes for the Thermal Striping Evaluation

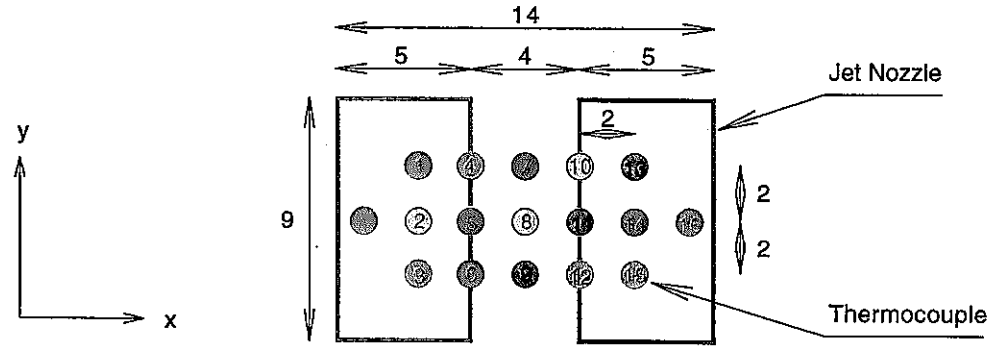
Items	① AQUA	② DINUS-3	③ THEMIS	④ BEMSET
1. Basic Equation	Time-Averaged N-S Eq.	Instantaneous N-S Eq.	Boltzmann Eq.	Thermoelastic Linealized Eq.
2. Mathematical Models				
Descretization	FDM	FDM		BEM
Solution Algorithm	Modified ICE	Leap-Frog	DSMC	
Approx. Method for Convection Terms	2nd Order QUICK	3rd Order Upwind		
Boundary Elements				Rectangular
Matrix Solver	ICCG	ICCG		Direct
Coordinate System	x-y-z / r- $\theta$ -z	x-y-z / r- $\theta$ -z	x-y-z / r- $\theta$ -z	x-y-z / r- $\theta$ -z
3. Physical Models				
Turbulence Model	ASM / RSM	None		
Molecular Model				
Collision Model			Monoatomic Sphere Bird's Model	
4. Others				
Numerical Stabilizer	Fuzzy Controller	Fuzzy Controller		



# Apparatus of a Fundamental Thermal Striping Experiment in Sodium Performed at PNC (TIFFSS-I)



# Thermocouple Arrangements to the Test Piece in the TUFFSS-I Experiment



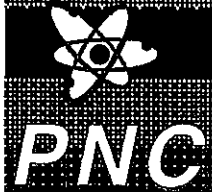
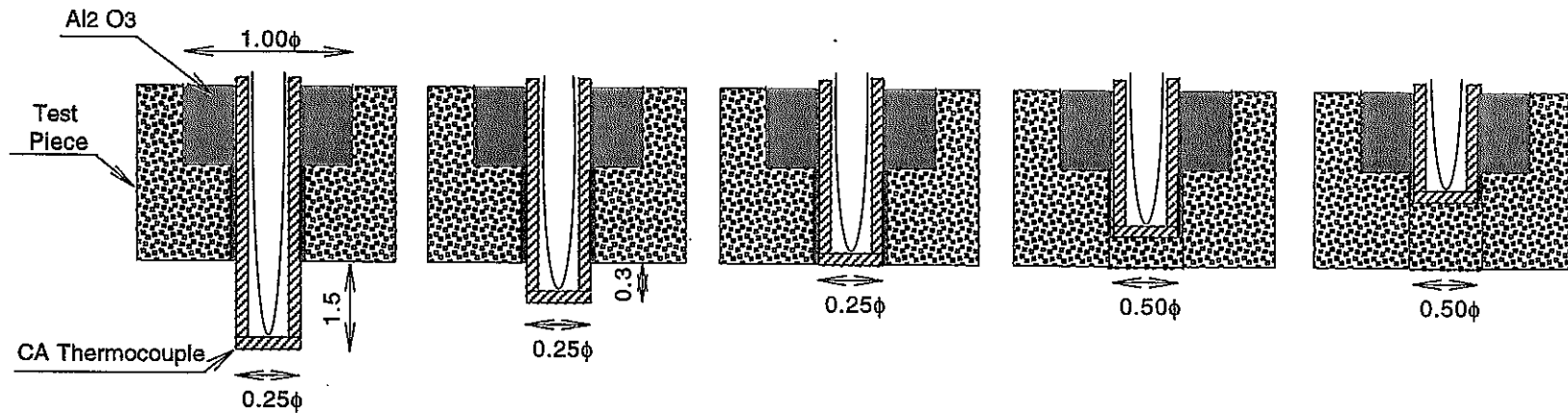
Fluid Temperature  
in Fully Turbulence  
Region

Fluid Temperature  
in Laminar Sub-Layer  
Region

Structural Temperature  
on Test Piece Surface

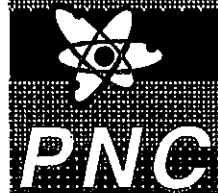
Structural Temperature  
at 0.2 mm from the Test  
Piece Surface

Structural Temperature  
at 0.5 mm from the Test  
Piece Surface

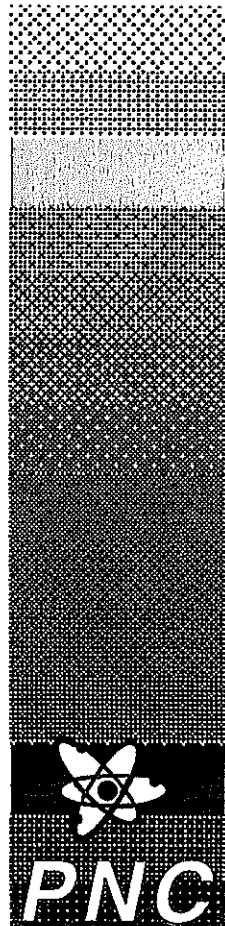


# Experimental Conditions

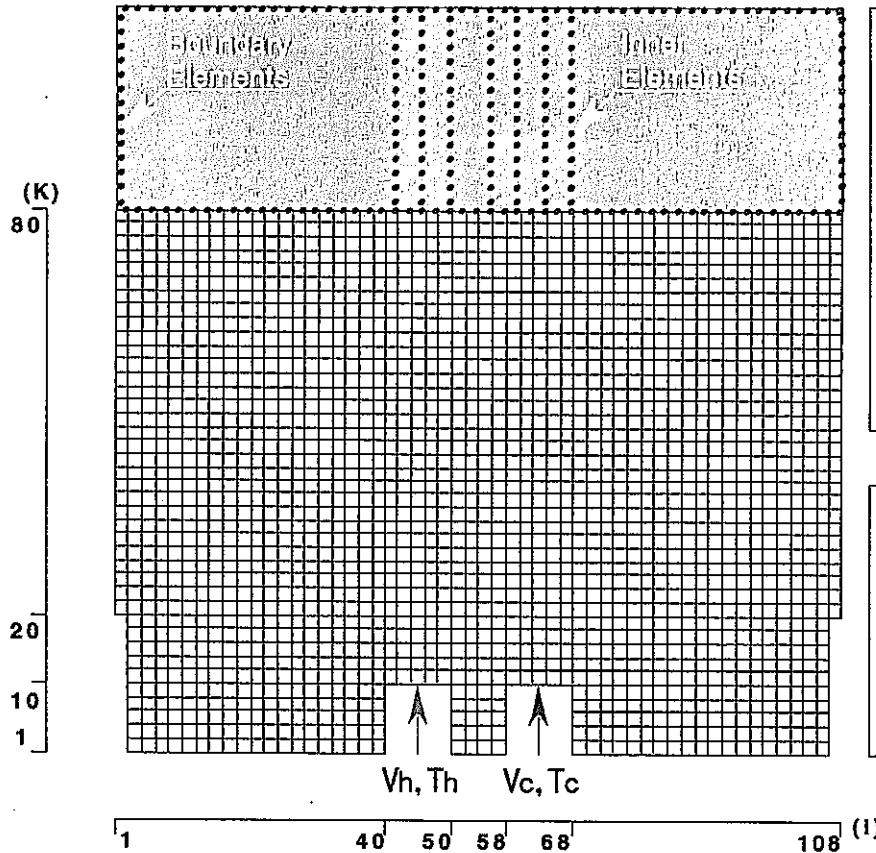
		Case - 1	Case - 2	Case - 3
Sodium Temperature (deg. C)	Hotter Side Nozzle	320.0		
	Colder Side Nozzle	280.0		
	Temperature Difference	40.0		
Sodium Velocity (m/s)	Hotter Side Nozzle	1.0	1.5	2.0
	Colder Side Nozzle	1.0	1.5	2.0
	Velocity Ratio	1.0	1.0	1.0
Sampling Speed (Hz)		200		
Sampling Length (sec)		100		
Oxygen Concentration (ppm)		~ 1.0		



# Mesh Arrangements and Computational Conditions



- 112 -



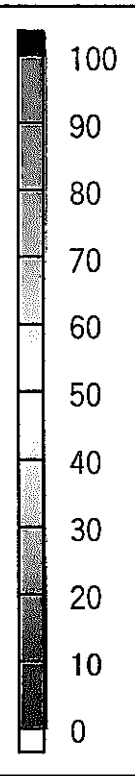
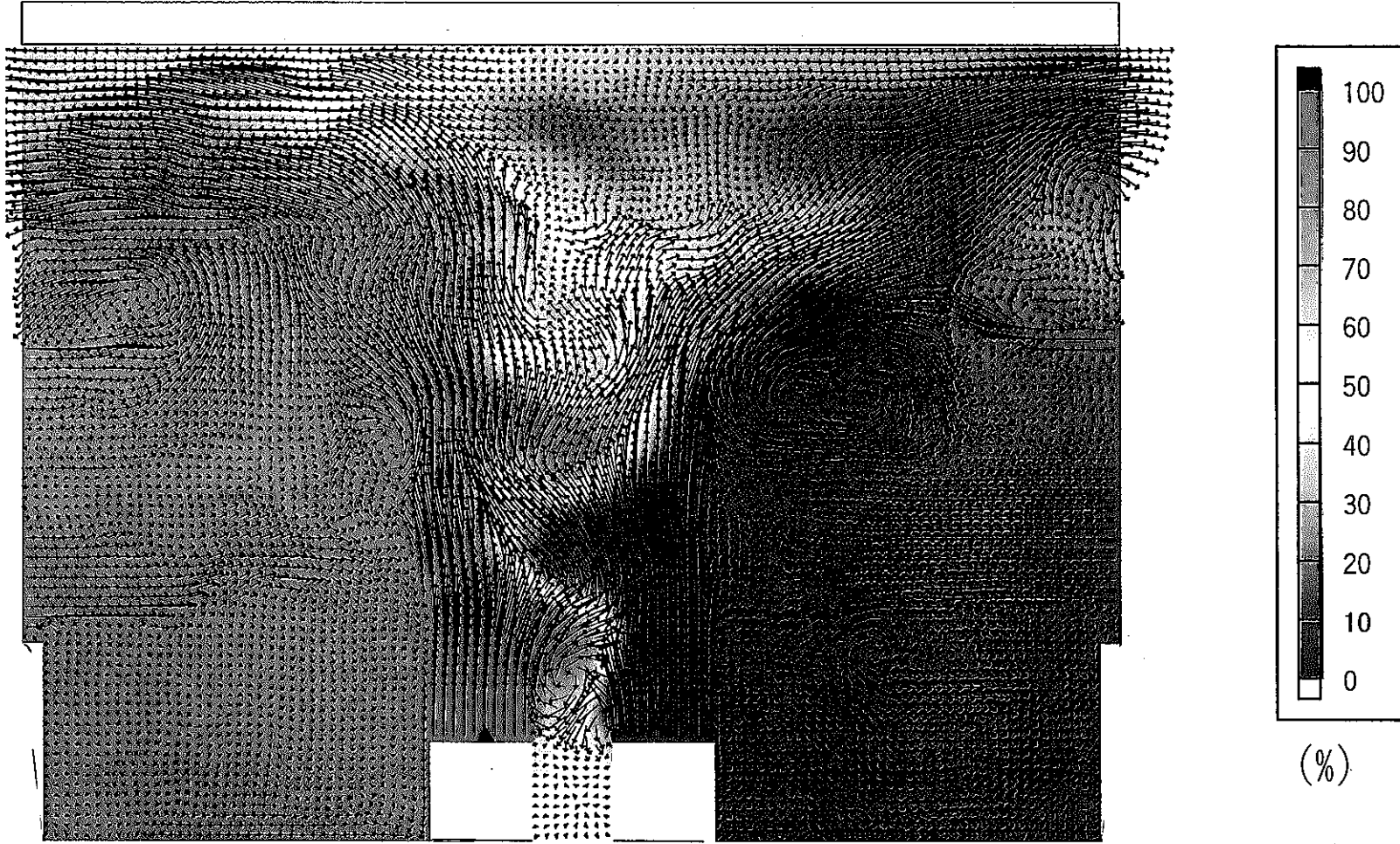
## DINUS-3

Coordinate System	: x-y-z 3D Cartesian Coord.
Mesh Division	: $108^1 \times 3^1 \times 80^K$ (0.5 mm Uniform)
Time Integration	: Leap-Frog
FDM Scheme for Convection terms	: 3rd Order Upwind
Wall Condition of the Test Piece	: No-Slip
Inlet Velocity Conditions	: Case-1 ( $V_h = V_c = 1.0$ m/s) Case-2 ( $V_h = V_c = 1.5$ m/s) Case-3 ( $V_h = V_c = 2.0$ m/s)
Inlet Temperature Conditions	: $T_h = 320^\circ\text{C}$ , $T_c = 280^\circ\text{C}$

## BEMSET

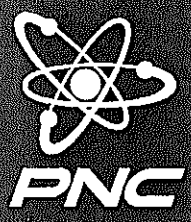
Coordinate System	: x-y-z 3D Cartesian Coord.
Element Arrangements	: 260 Boundary Elements, 203 Inner Elements (0.5 mm Uniform)
Temperature Conductivity Upper Wall Temperature	: $22 \text{ mm}^2/\text{s}$ for $300^\circ\text{C}$ Condition of SUS304 $300^\circ\text{C}$ Constant

# Calculated Instantaneous Velocity Vector and Sodium Temperature Fields (Case-3)

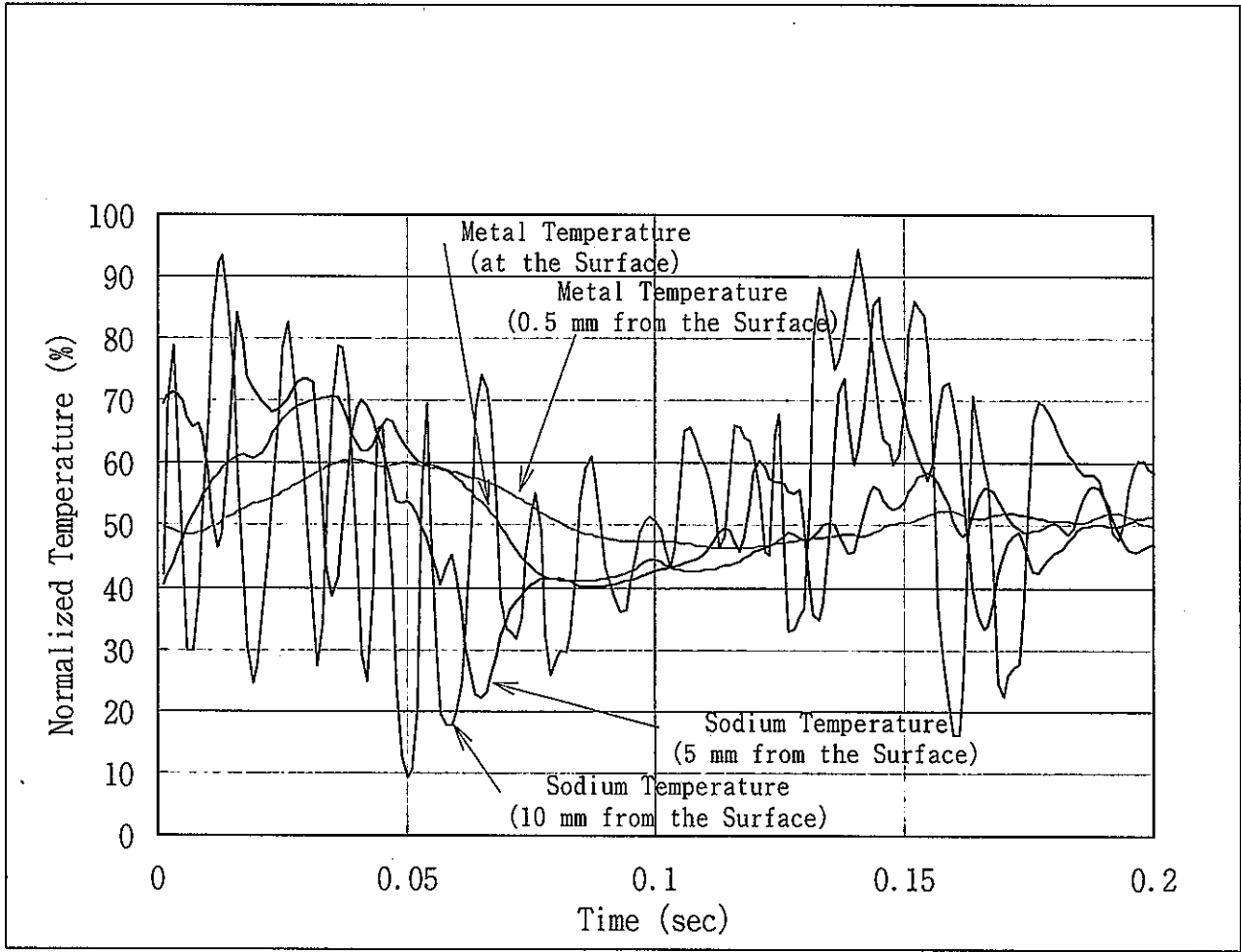


(%)

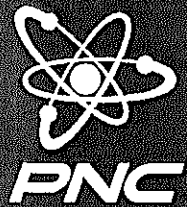
5 (m/s)



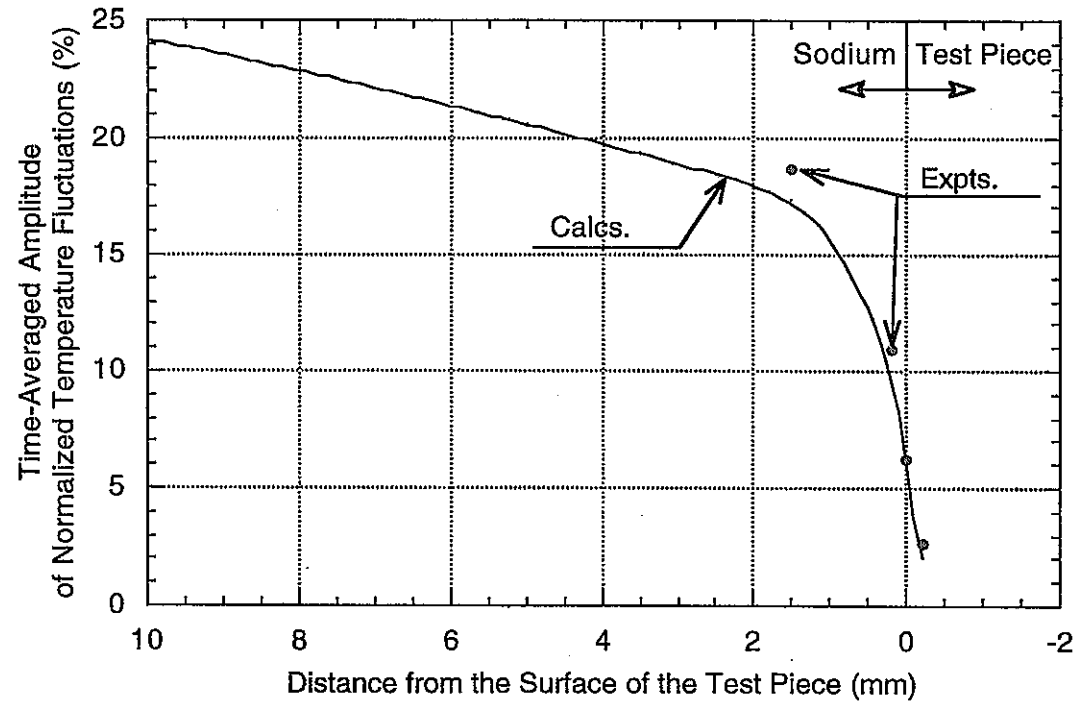
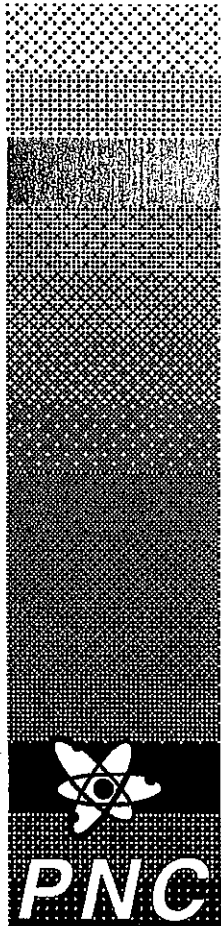
# Calculated Temperature Transients (Case-3)



*Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center*



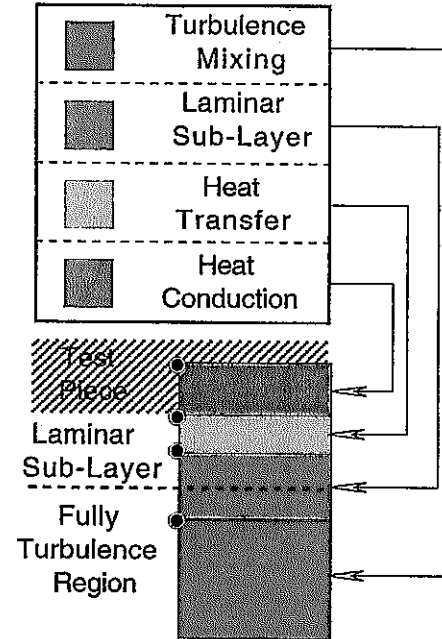
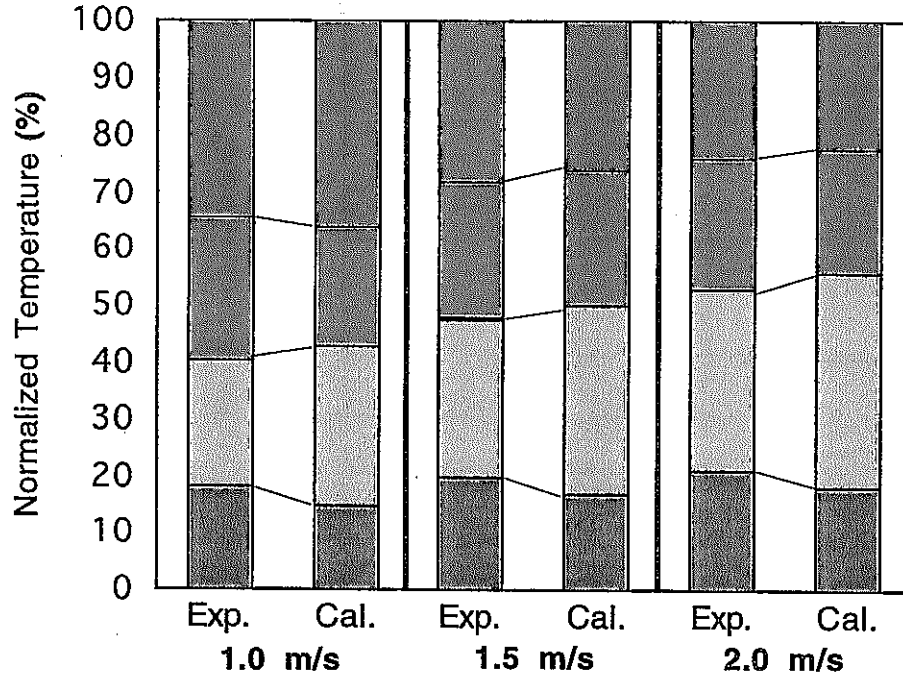
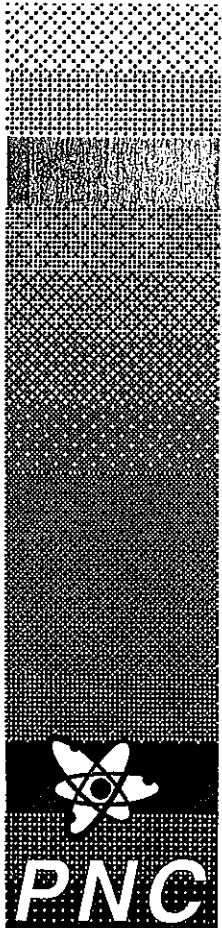
# Comparison of Damping Characteristics of Temperature Fluctuations (Case-3)



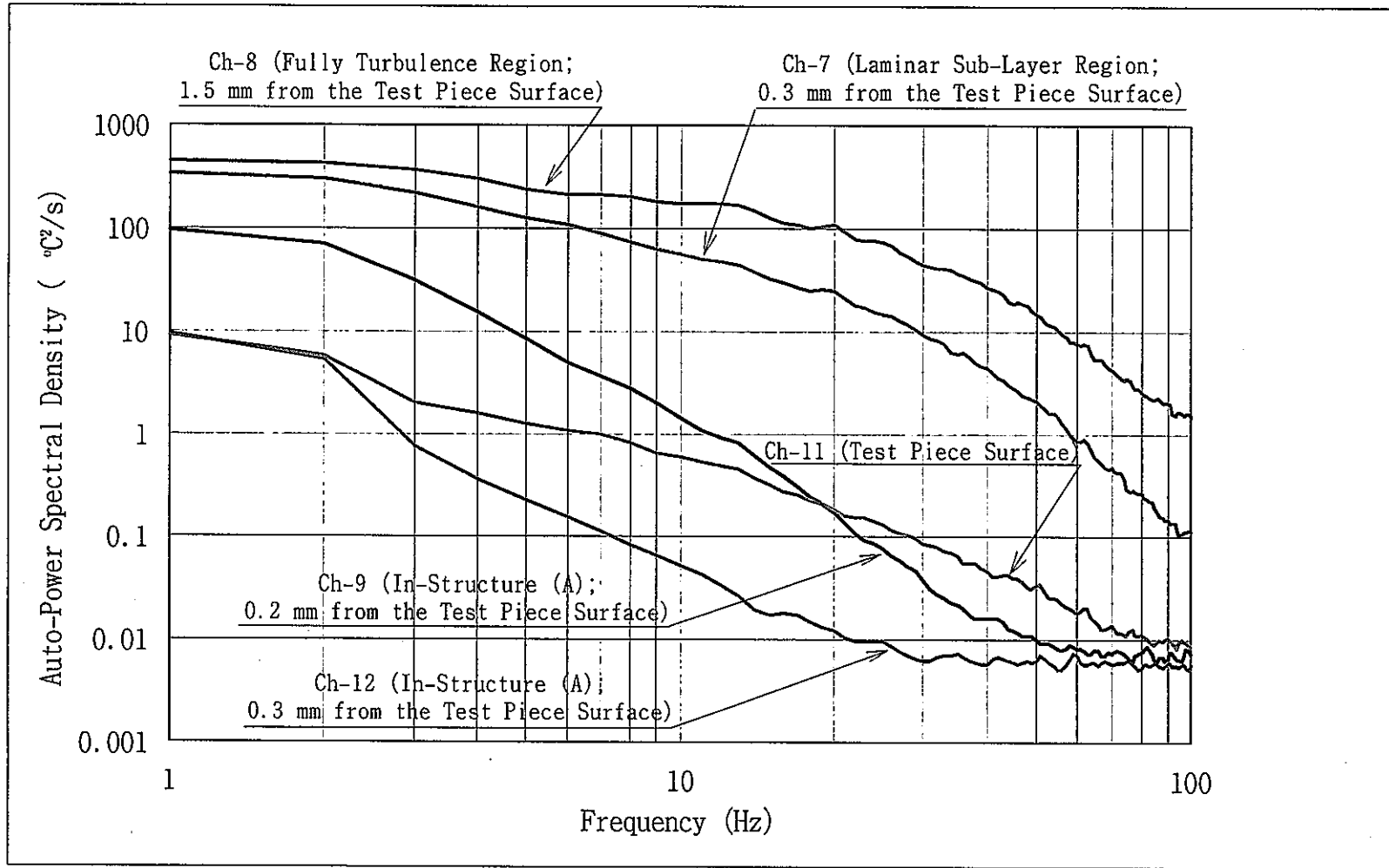


# Comparison of Damping Ratio for Temperature Fluctuation Amplitude

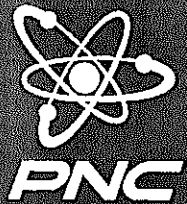
- 116 -



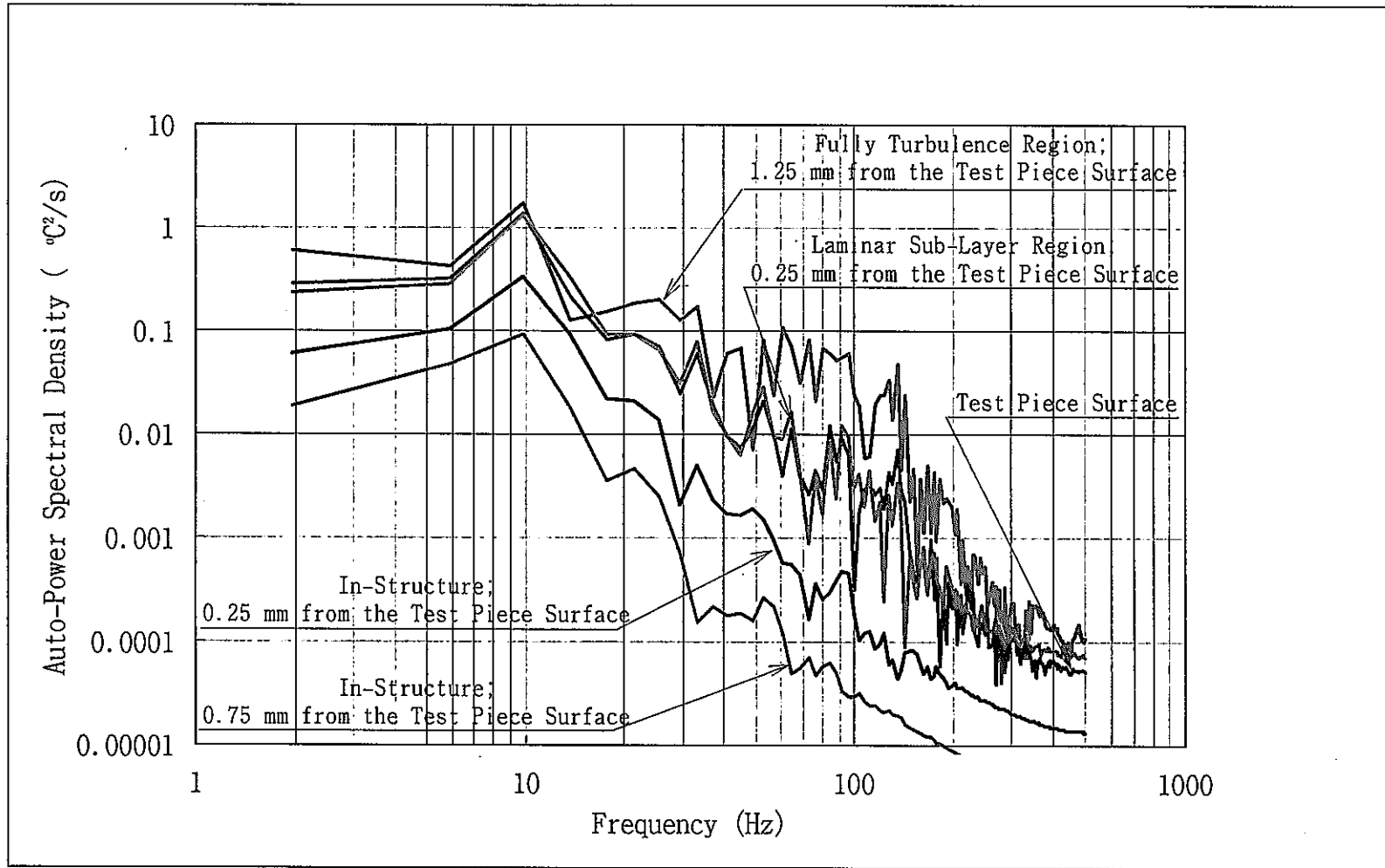
# Measured Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3



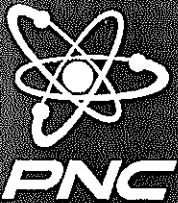
- 117 -



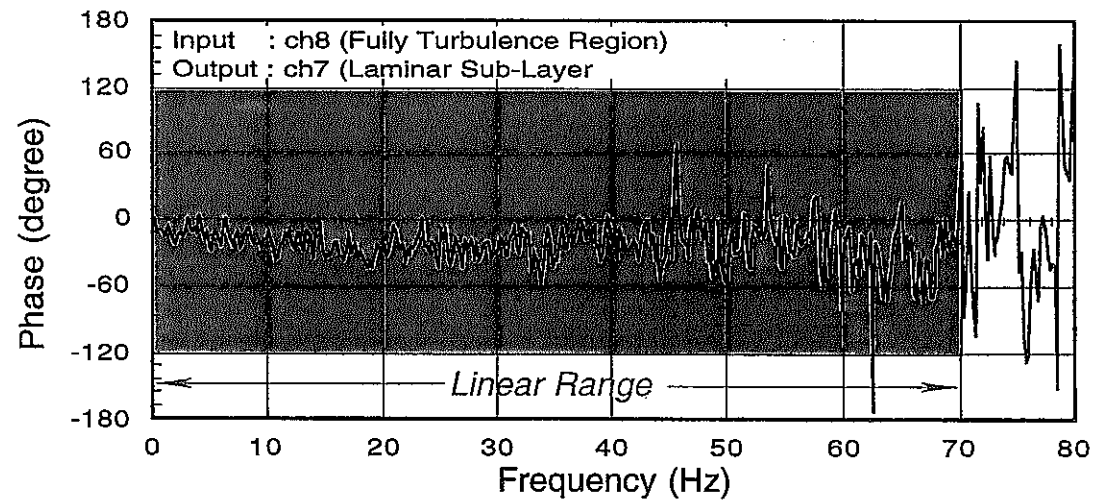
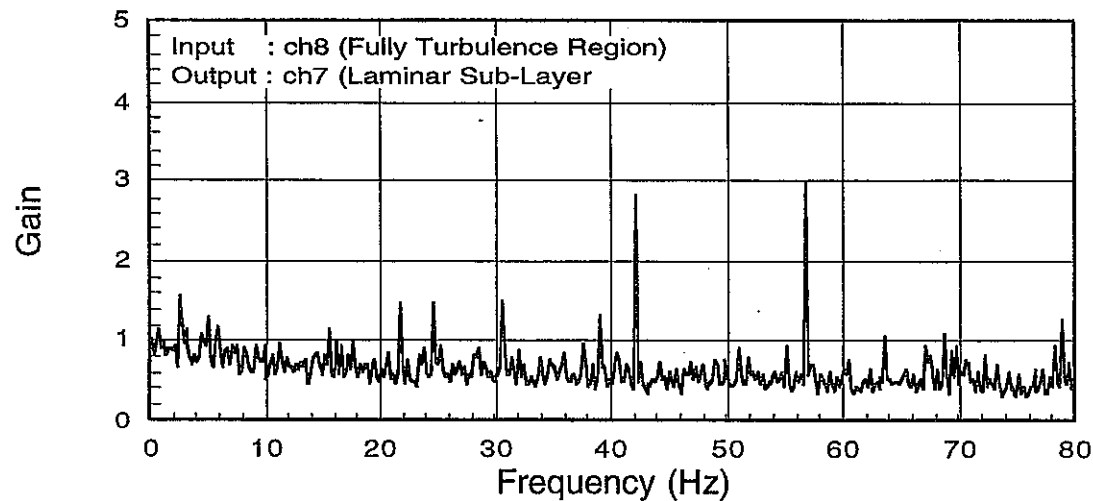
# Calculated Auto-Power Spectral Density Functions for Case-3



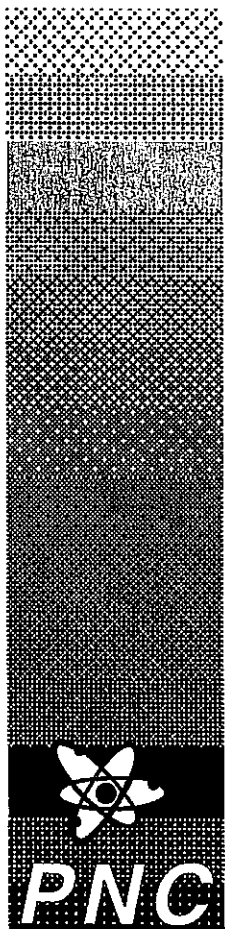
*Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center*



# Measured Frequency Response Function (Ch. 8 ---> Ch. 7)

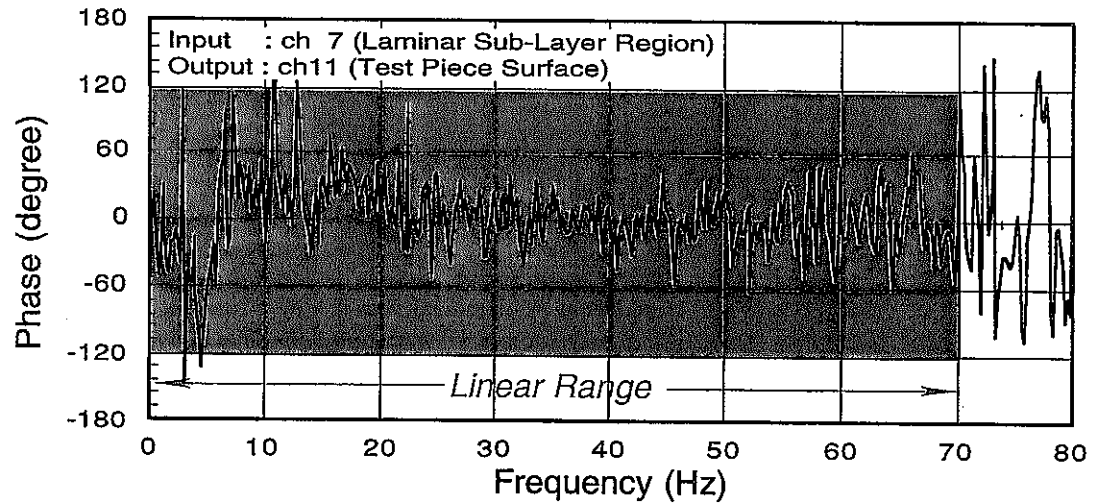
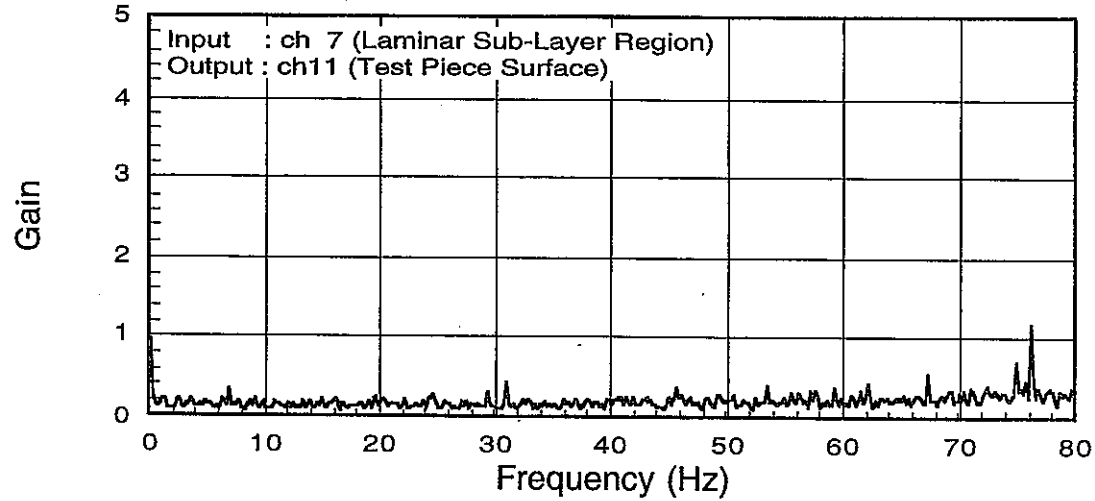
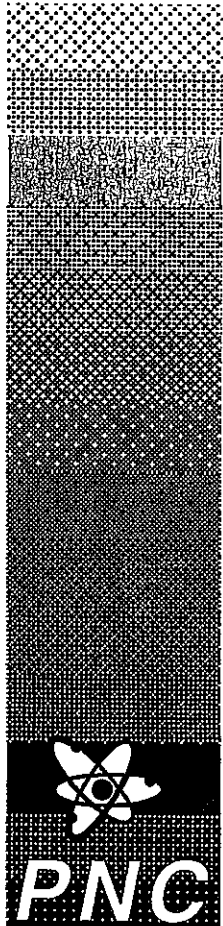


*Thermal Hydraulic Research Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center*



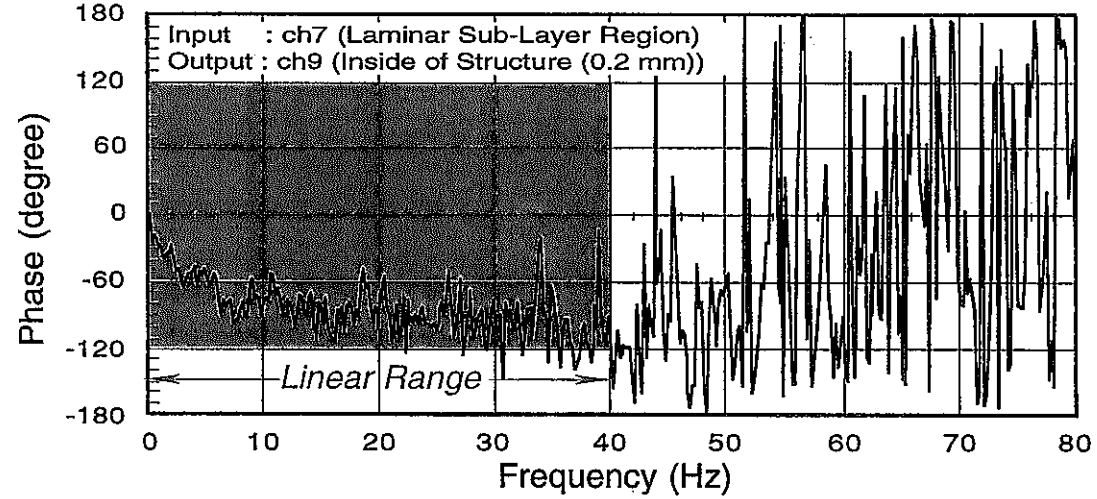
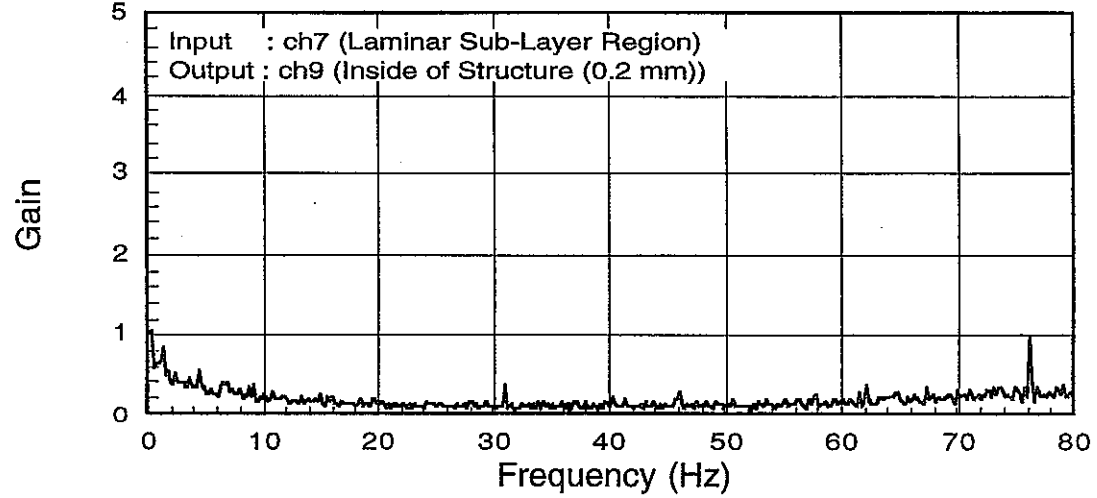
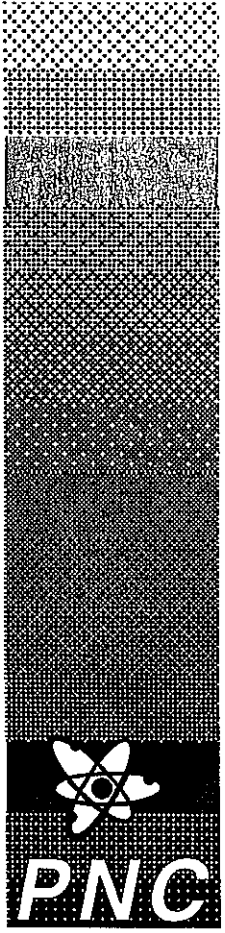
# Measured Frequency Response Function (Ch. 7 ---> Ch. 11)

- 120 -

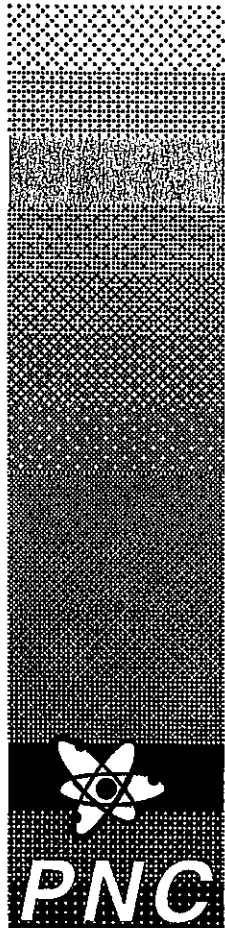
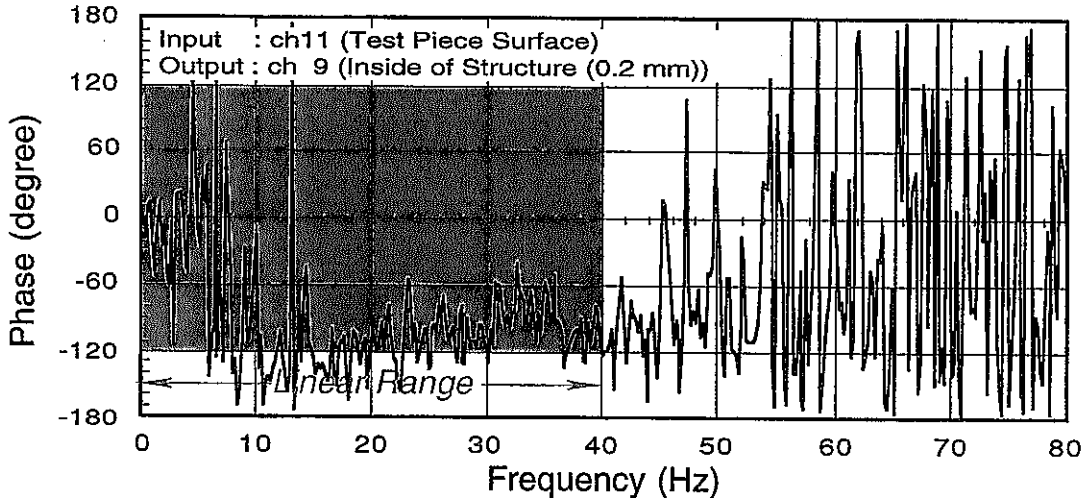
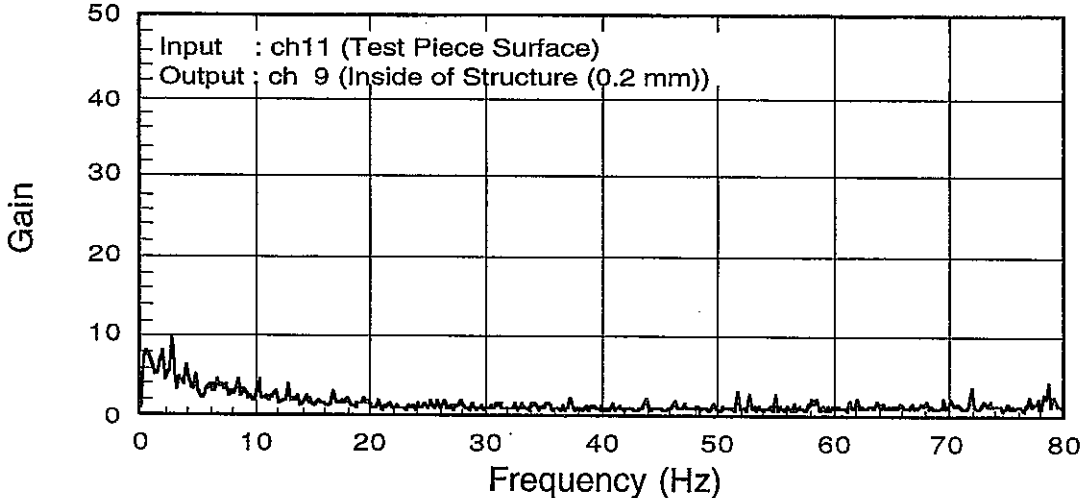


# Measured Frequency Response Function (Ch. 7 --> Ch. 9)

- 121 -

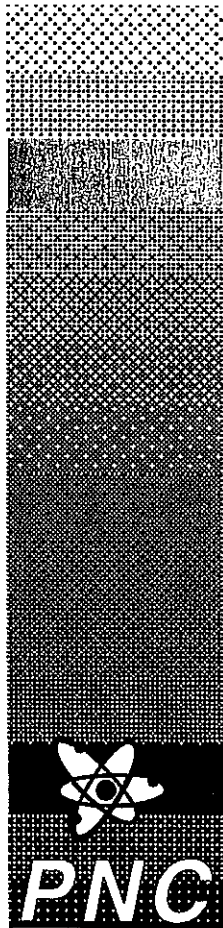


# Measured Frequency Response Function (Ch. 11 --> Ch. 9)

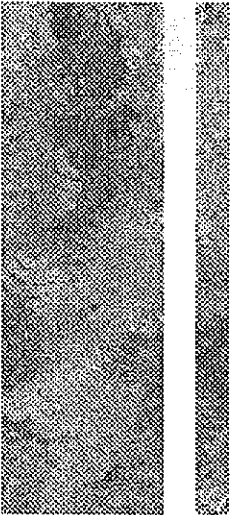


## Conclusions

- Decrease Rapidly of the Measured Temperature Fluctuation Amplitudes in Laminar Sub-Layer Region
- Numerical Analysis of Non-Stationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System
- Good Agreement Between Numerical Results and Experimental Data
  - \* Time-Averaged Distribution of Temperature Fluctuation Amplitude
  - \* Damping Characteristics for Temperature Fluctuation Amplitude in the Course of Heat Transport toward Structures
- Numerical Methods are Applicable to the Thermal Striping Phenomena in Arbitrary Reactor Geometries







**AUTOMATED IDENTIFICATION OF MATERIAL  
CONSTANTS IN INELASTIC CONSTITUTIVE EQUATIONS  
BY CONTINUOUS EVOLUTIONARY ALGORITHM  
AND MASSIVELY PARALLEL PROCESSORS**



**ASME/JSME PVP 98' , 27-30 July 1998, San Diego**

**Nobuchika Kawasaki (PNC, Japan) , Sunil Felix (CEA, France),  
Naoto Kasahara (PNC, Japan),  
Tomonari Furukawa, Shinobu Yoshimura, and Genki Yagawa  
(University of Tokyo, Japan)**

# INTRODUCTION

- Realistic constitutive equations have physical models of material with a number of constants.
- Difficulty to determine the constants yields the limitation of the use of constitutive equations.
- This paper presents a general method and its parallel system implementation to identify unknown material constants.

e.g  $x^t = (a, n, k^*, K_0, a_K, a_R, a_1, c_1, a_2, c_2, \phi_\infty, b, \beta_1, \beta_2, r_1, r_2, \gamma, m, \eta, \mu, Q_0, Q_{\max}, Q_r^*)$

## FORMULATION

- Curve fitting approach with a trial and error procedure are not suitable for general use.
- Stepwise and iterative local operations are not always adequate from the viewpoint of the global optimization of all the constants.
- The whole set of constants can be identified simultaneously by minimizing residuals between measured data and predicted model response, in corporation with an optimization method.

# Objective function $f(\mathbf{x})$

## Residuals

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n f_j(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_{ij} \left| \sigma^{\text{exp.}}(\varepsilon_{ij}) - \sigma^{\text{pred.}}(\varepsilon_{ij}, \mathbf{x}) \right|$$

**X:** A set of material constants

where  $n$  is the number of experiments,  
 $m$  number of evaluation points,  
input strain at the  $i$ -th evaluation  
point in the  $j$ -th experiment,

## *ADVANTAGE of this formulation*

- (1) All material constants can be identified simultaneously
- (2) It can be applied to any kinds of constitutive equations
- (3) Anyone can get the same results automatically
- (4) Any scattered experimental data under different experimental conditions can be utilized
- (5) Various optimization problems can be designed by changing weight functions.

## *ESSENCE of this formulation*

### **Problem**

A general method , but  
this direct formulation needs huge calculation time

### **Solution**

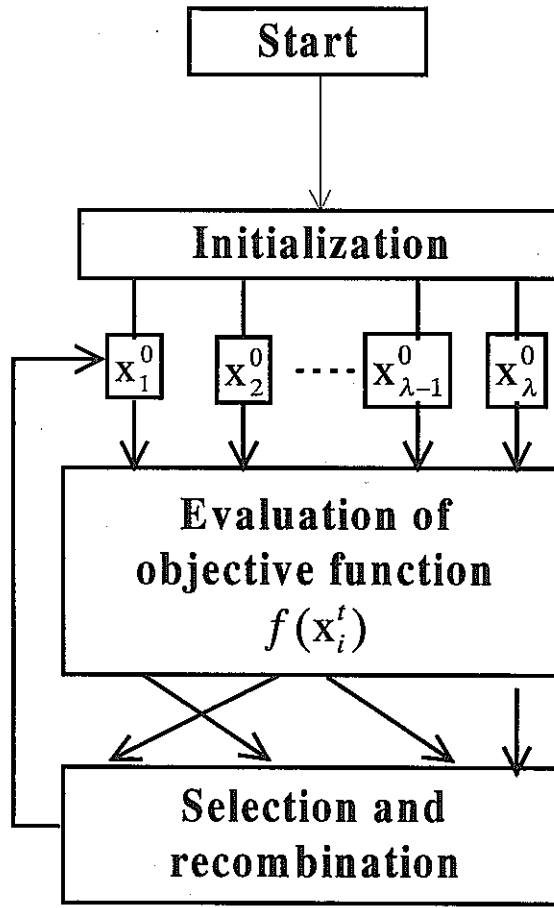
The most effective search method

*Continuous Evolutionary Algorithm (CEA)*

The most effective calculation method

*Massively Parallel Processors (MPP)*

# CEA-based evaluation with MPPs



$$P^t = \{x_1^t, \dots, x_\lambda^t\} \in V^\lambda$$

$x_i^t$  : a set of material constants

MPPs CRAY T3D

CEA optimizes the material constants by the object functions

$x_{BEST}^t$  At last CEA obtains the best constants

## *APPLICATION of proposed method*

### **Ohno-Wang model**

Simple, Easy to identify manually



Manual and CEA identification

Reliability of CEA

### **Chaboche's model**

Complicated, Difficult to identify manually



CEA identification

Effectiveness of CEA



# RELIABILITY

## Ohno-Wang model

kinematic hardening rules  
with a critical state of  
dynamic recovery

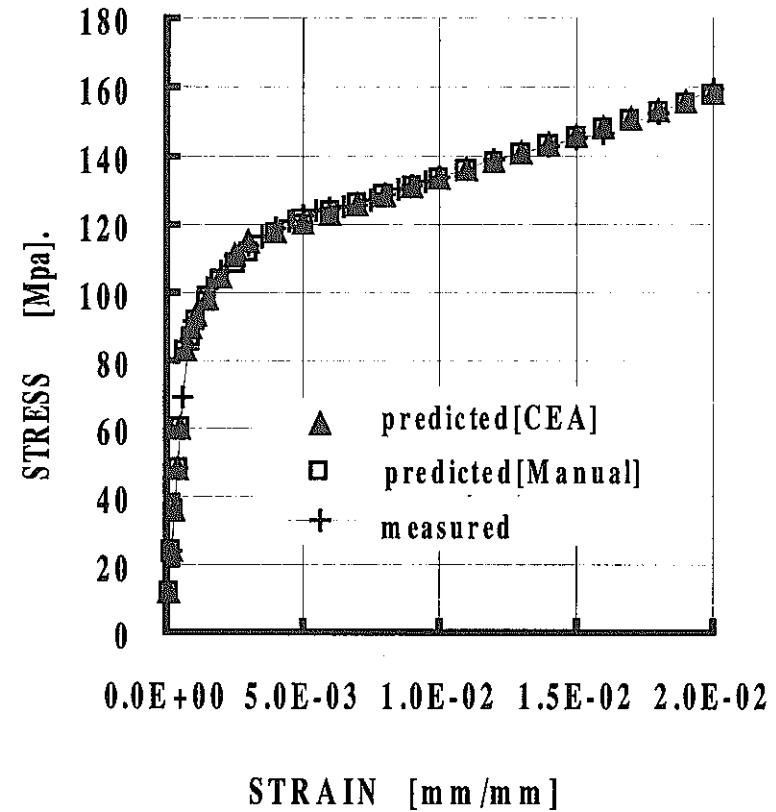
$$\alpha = \sum_{i=1}^M \alpha_i \quad f_i = \bar{\alpha}_i^2 - r_i^2 = 0$$

$$\dot{\alpha}_i = \zeta_i \left[ \frac{2}{3} r_i \dot{\epsilon}^p - H(f_i) \left\langle \dot{\epsilon}^p : \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \right\rangle \alpha_i \right]$$

$$x^t = (r_i, \zeta_i), \quad i = 1, \dots, 10$$

### Manual and CEA identifications

Both methods can obtain  
the best material constants.  
This case shows reliability of CEA.



# EFFECTIVENESS

## Chaboche's model

In this model, viscoplastic characters of material are expressed by viscoplastic potential  $\Omega$ .

$$\Omega = \frac{K}{\alpha(n+1)} \exp\left(\alpha \langle \sigma_v / K \rangle^{n+1}\right) \quad \sigma_v = J(\sigma - X) - \alpha_R R - k$$

Material constants are 23 and mutual-related

$$x^t = (a, n, k^*, K_0, a_K, a_R, a_1, c_1, a_2, c_2, \phi_\infty, b, \beta_1, \beta_2, r_1, r_2, \gamma, m, \eta, \mu, Q_0, Q_{\max}, Q_r^*)$$

Almost impossible to manually identify,  
but CEA can obtain the best constants

# Identification

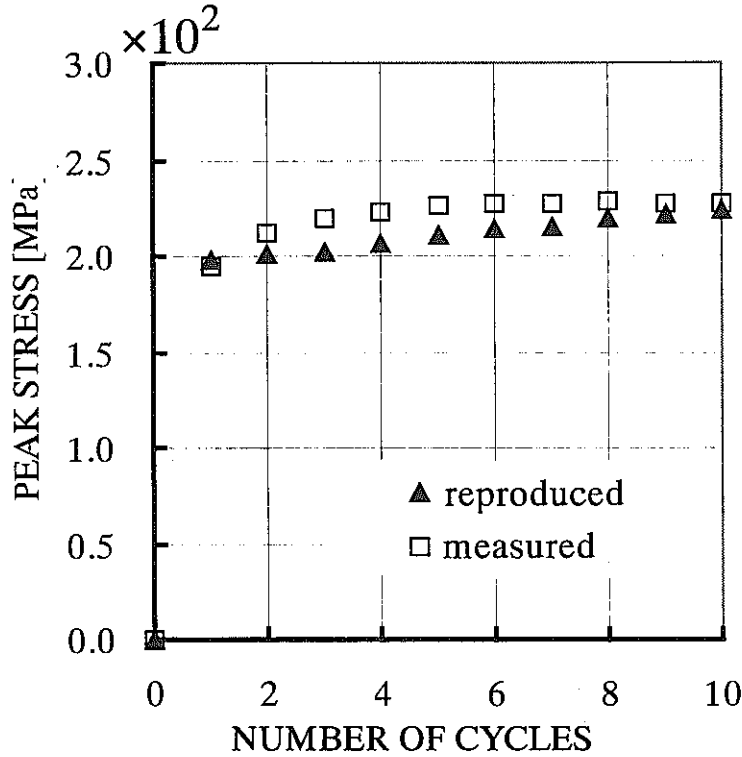
Three cases of experimental data  
to reproduce features of the Chaboche's model

Austenitic stainless steel SUS304 , 550°C

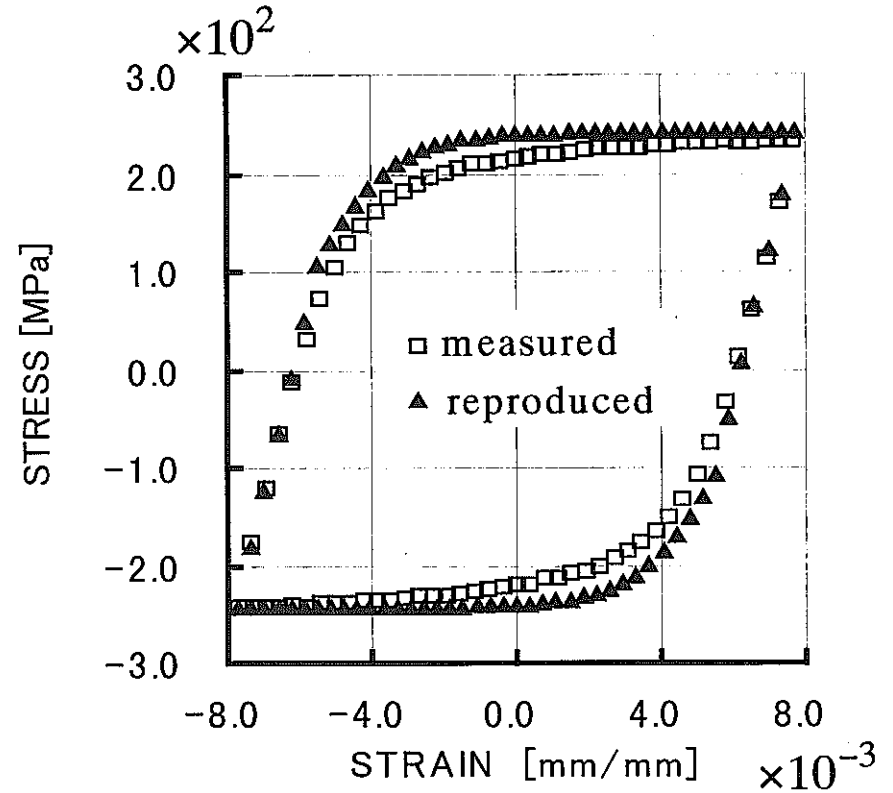
## Conditions of experiments

<i>Case</i>	<i>Strain Range (mm/mm)</i>	<i>Strain Rate (mm/mm · s)</i>	<i>Stabilized Cycle</i>
<i>1</i>	<i>4.88E-3</i>	<i>1.00E-3</i>	<i>50</i>
<i>2</i>	<i>1.01E-2</i>	<i>1.00E-3</i>	<i>80</i>
<i>3</i>	<i>1.54E-2</i>	<i>1.00E-6</i>	<i>75</i>

# Measured data and the Reproduced data



Variation of peak stress  
(case 3)



Stress-strain curve at stabilized  
cycle (case 3)

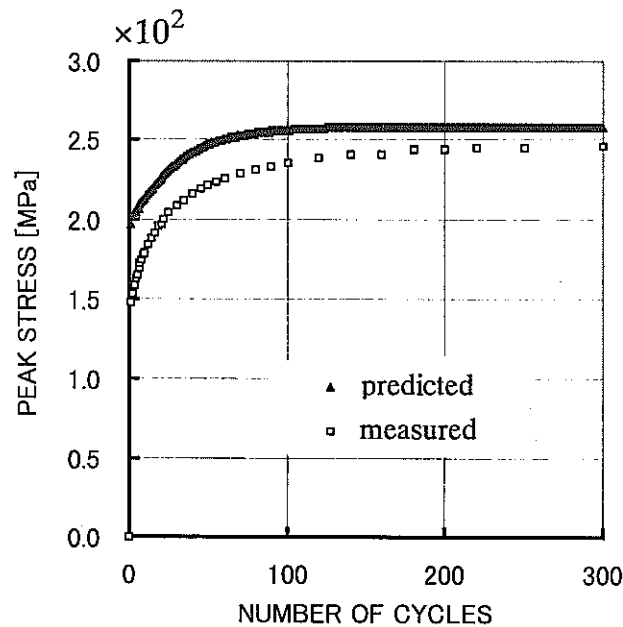
CEA can obtain the best material constants.

# Verification

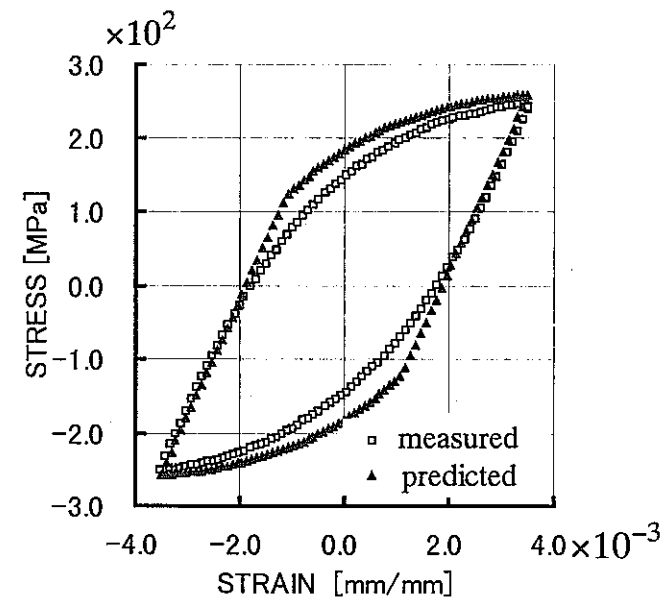
## Conditions of experiment for verification

Case	Strain Range (mm/mm)	Strain Rate (mm/mm °s)	Stabilized Cycle
4	7.02E-3	1.00E-3	300

Different case from identification



Variation of peak stress (case 4)



Stress-strain curve at stabilized cycle (case 4)

The material constants are valid for other conditions.

## **CONCLUSIONS**

- **A general method to automatically identify unknown material constants in complex constitutive equations was developed using a CEA and MPPs.**
- **Through application to Ohno-Wang model, the proposed method has been found to be able to identify constants as accurately as the conventional manual technique.**
- **23 material constants in Chaboche's model, which was not possible by manual operation were successfully identified from experimental data.**