

分 置

PNC I N 1420 95-011

本資料は2002年 2月 25日付で登録区分、  
変更する。

[技術情報室]

# フロンティア研究評価関連資料集－3

(OHPシート集)

1994年5月

フロンティア研究推進委員会

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ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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, 319-1184  
Japan

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

# 目 次

## 93B 基盤技術開発

### 93B1 人工知能

93B105 高次推論機構の研究 .....	1
93B106 適応機構の研究 .....	19
93B107 知的運転制御システムの開発 .....	36
-----	

### 93B2 新材料・超電導

93B211 基盤原子力用材料データフリーウェイの開発 .....	71
93B212 複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発 .....	101

### 93B3 レーザー

93B306 自由電子レーザー用高性能鏡の開発 .....	132
93B307 大電流・高品質ビーム入射器系の開発 .....	167

### 93B4 知的支援

93B401 運転員の深い理解支援方策の研究 .....	186
------------------------------	-----

### 93B5 計算科学

93B501 計算科学的手法による流体一構造系の統合ミュレーション の研究 .....	201
93B502 繰り返し有限要素法解析を用いた体系的評価法の開発 .....	215
93B503 クリープ疲労損傷過程のコンピュータミュレーション技術の開発 .....	280
93B504 オブジェクト型汎用シミュレーション手法の開発 .....	303
93B505 アクチド系化合物の5f電子挙動に関する量子化学的計算 手法の研究 .....	315

### 93B6 ビーム

93B601 電子線形加速器による陽電子生成 .....	345
------------------------------	-----

# 高次推論の研究

技術開発部 先進技術開発室

吉川 信治

## 開発目標

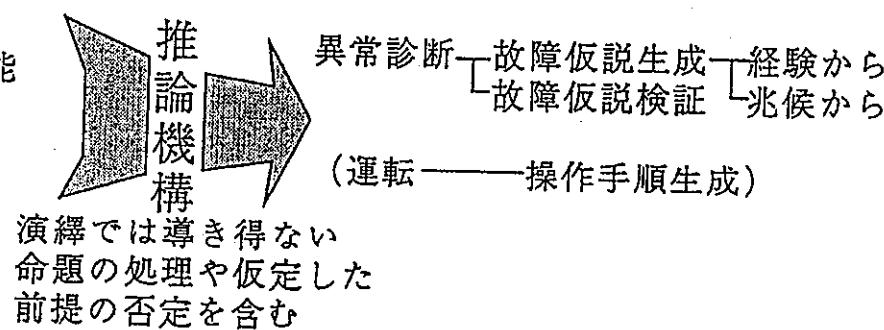
より人間に近い推論システムへ向けて

原子力プラントにおける情報

複雑・大規模

運転・処置要領  
系統・機器の機能／性能  
系統・機器の形状  
計装制御系の構造  
経験データ  
等

プラント運転・保守に必要な  
知的機能  
多様



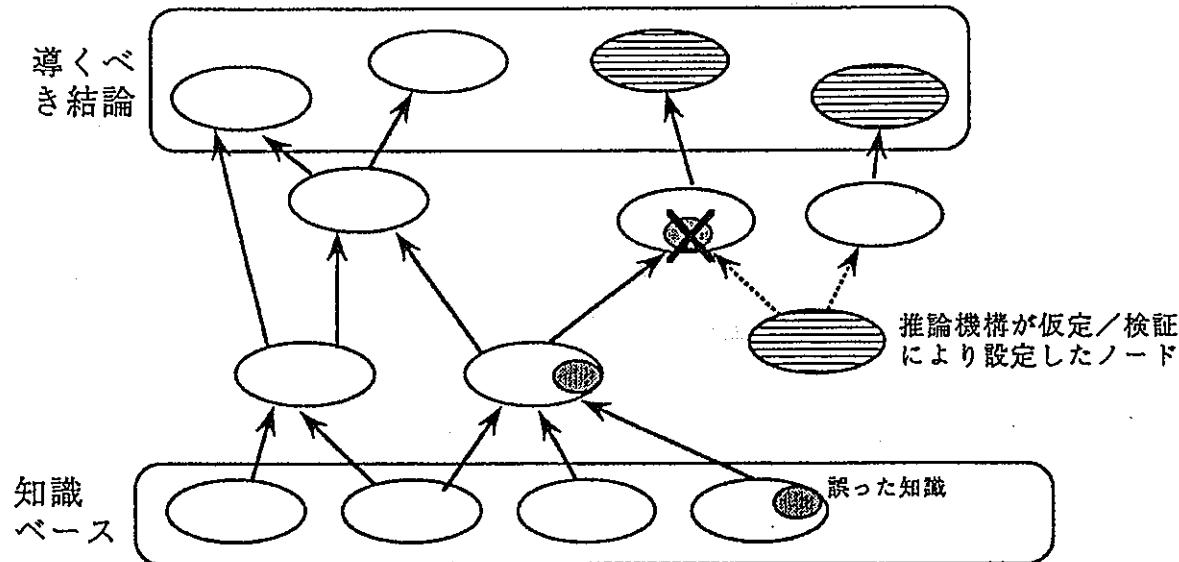
----柔軟で高機能な推論システムが必要

## 効果予測

### 知識獲得のボトルネックの軽減

知識ベース内の局所的な不完全性に対してロバストな推論機構

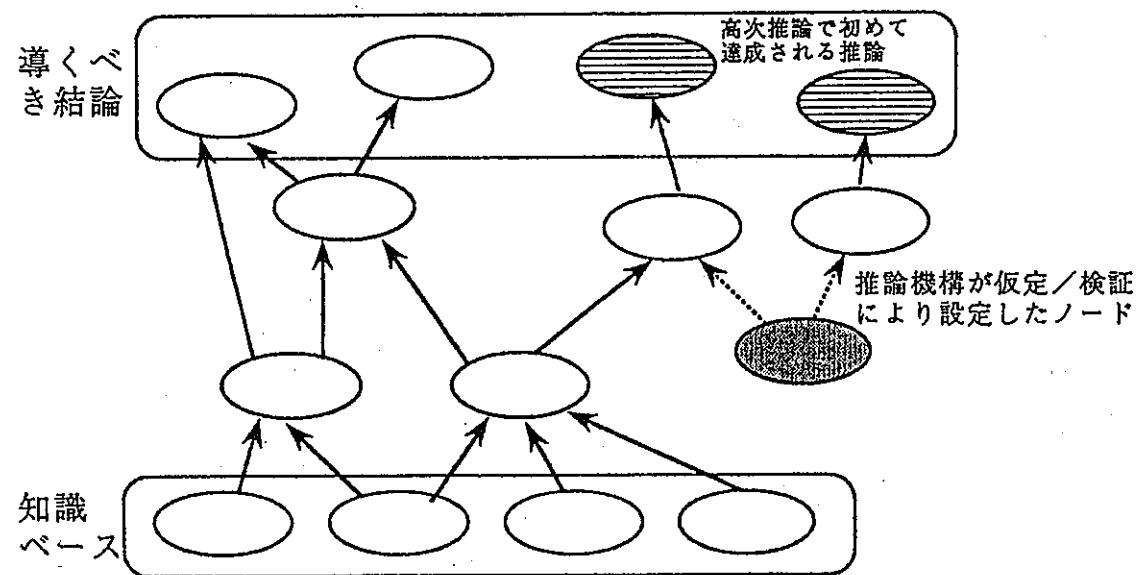
= (知識ベースの冗長性 + 推論の結論と新たな観測事実) による、結論の妥当性維持



## 効果予測

現在運転員が果たしている多様で複雑な思考、意志決定機構の自律化

既存の知識ベースからの演繹では導出できない結論でも、  
自ら推定・確認を繰り返して結論に到達できる推論機構

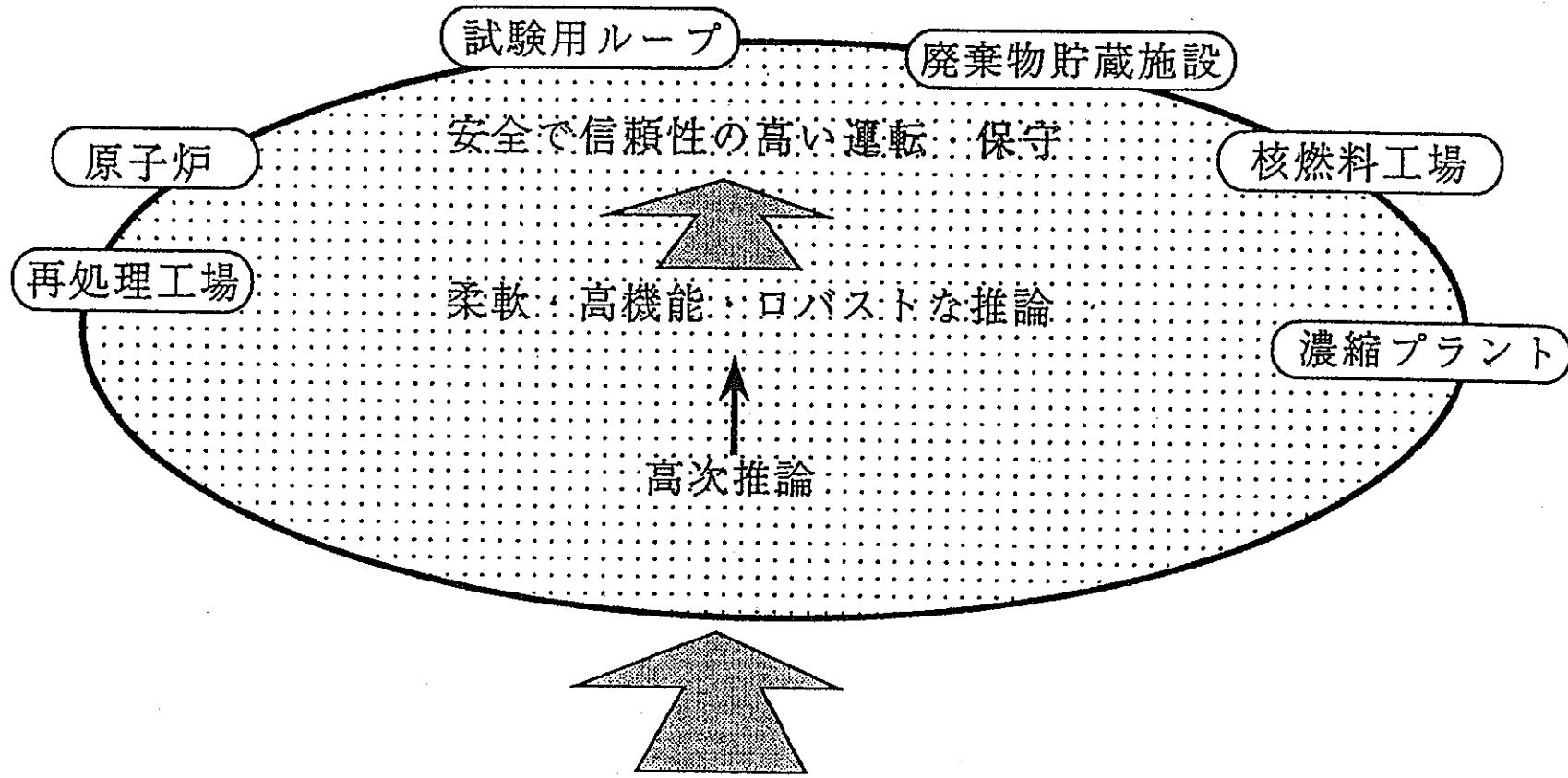


## 事業団プロジェクト技術への反映

長期目標

-5-

本研究のゴール



高次推論による自律的異常診断機構の構築

## 内外の現状レベル 原子力分野での研究：

### 推論手法

仮説推論

### 応用課題

原子炉設計支援システム

(東大)

設計を探査型仮説推論ととらえ、原子炉設計を目的とする人工知能ベース設計支援システムの枠組みが提案されている

仮説推論

運転員思考モデル

(動燃)

運転訓練シミュレータを用いて収集した運転員の挙動データの分析から、仮説推論をベースとする運転員思考モデルを構築

帰納推論

核燃料化学処理工程エキスパートシステム (D O E)

膨大な数の実験データを帰納的に解析して一般法則を導き、効率的な工程フローシート用エキスパートシステムを開発

## 内外の現状レベル 人工知能一般での研究：

### 個別推論手法の効率化

仮説推論：高速仮説推論手法（線形計画法、経験に基づく学習等による）  
計算コストに関する考察

類推（類似性に基づく推論と広義に捕える）：

説明に基づく学習(EBL)  
事例に基づく推論(CBR)  
記憶に基づく推論(MBR)

.....原子力プラントの運転・保守における診断タスク全般に対して汎用性のある高次推論機構の研究を着手する好機

## 実施内容

①高次推論の事例調査

②高次推論手法の要件の整理

③高次推論システムの設計／製作

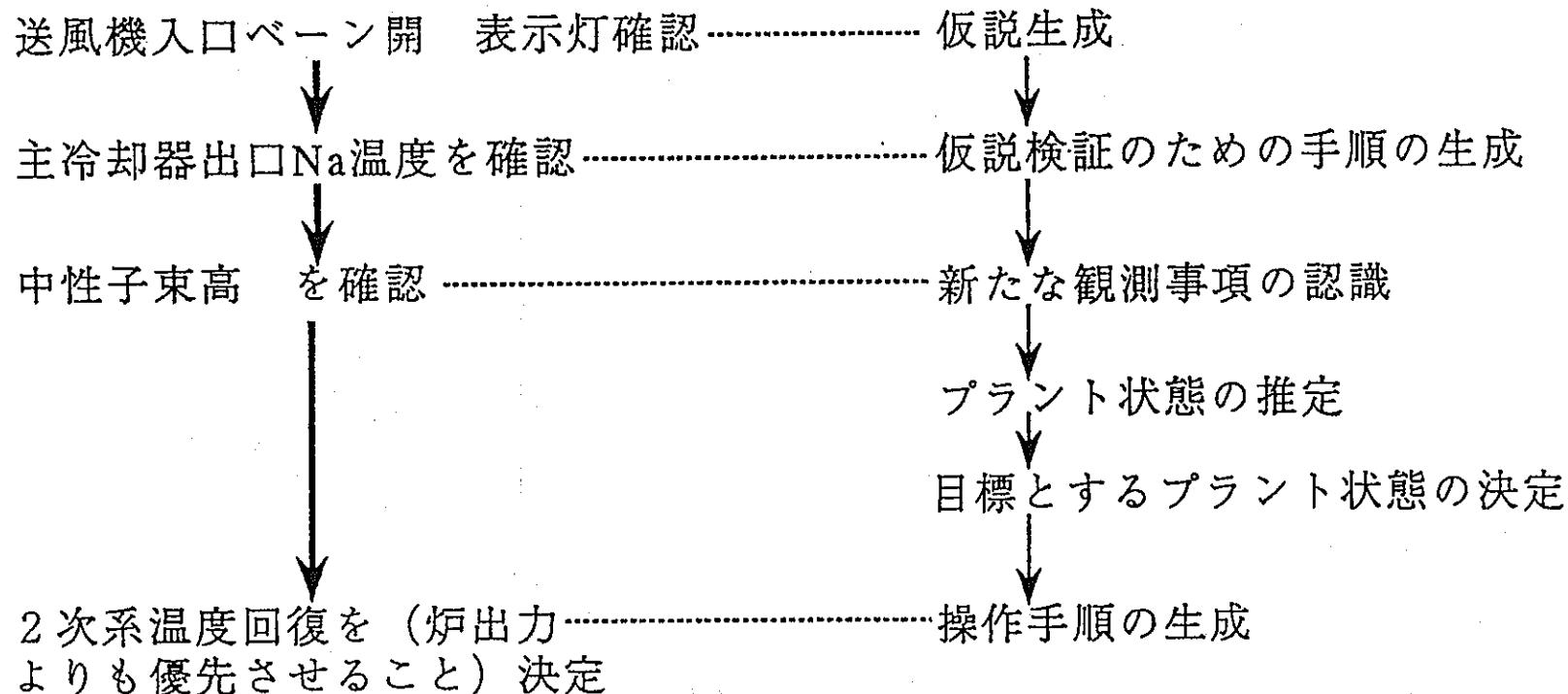
## 実施内容①：高次推論の事例調査

常陽の運転・保守における  
(人間による) 高次推論の事例収集

記録&経験から、  
思考、判断過程の分析  
／工学的な実現を想定したフローチャートの作成

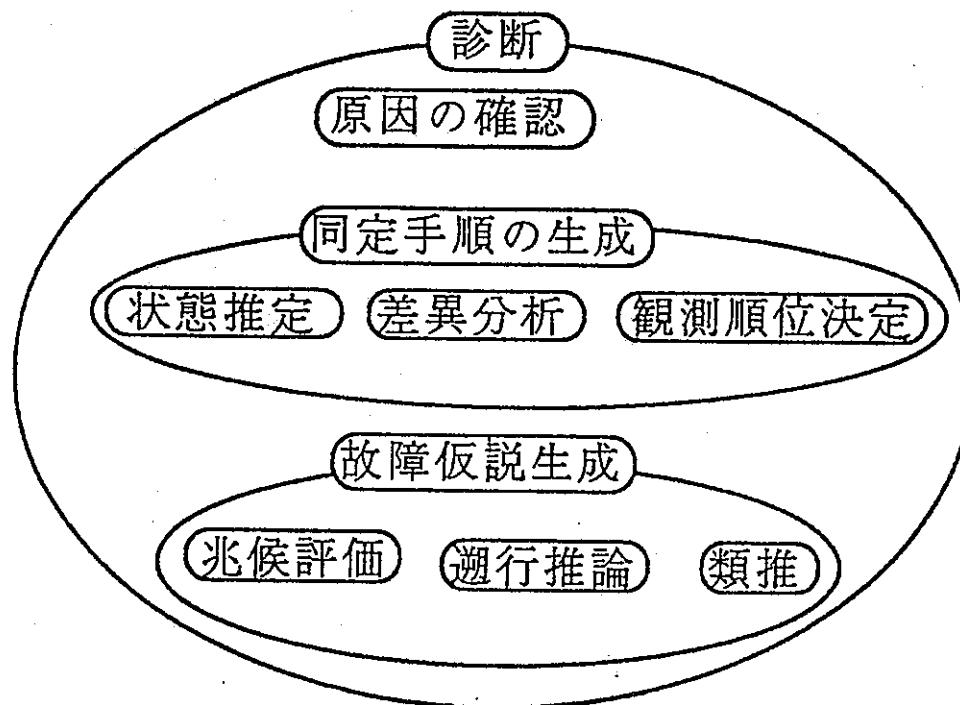
.....プラントの運転・保守における高次推論の動作シナリオ集の作成

## 実施内容①：高次推論の事例調査



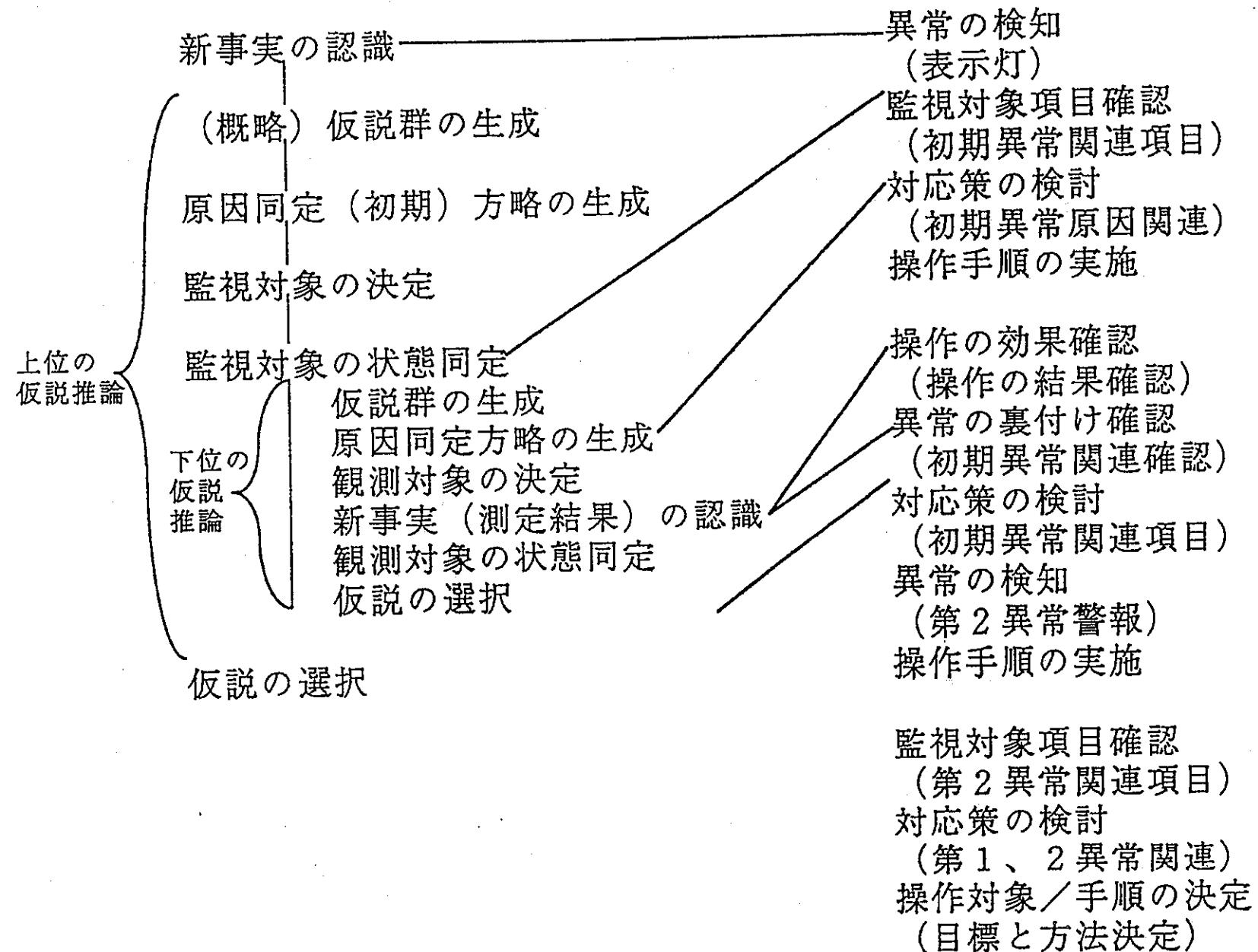
## 実施内容②：高次推論手法の要件の整理

運転・保守における高次推論のシナリオ集  
……いくつかの典型的パターンに分類・定式化



帰納推論、仮説推論、類推等、  
既に定義されている機構を用いて詳細に記述

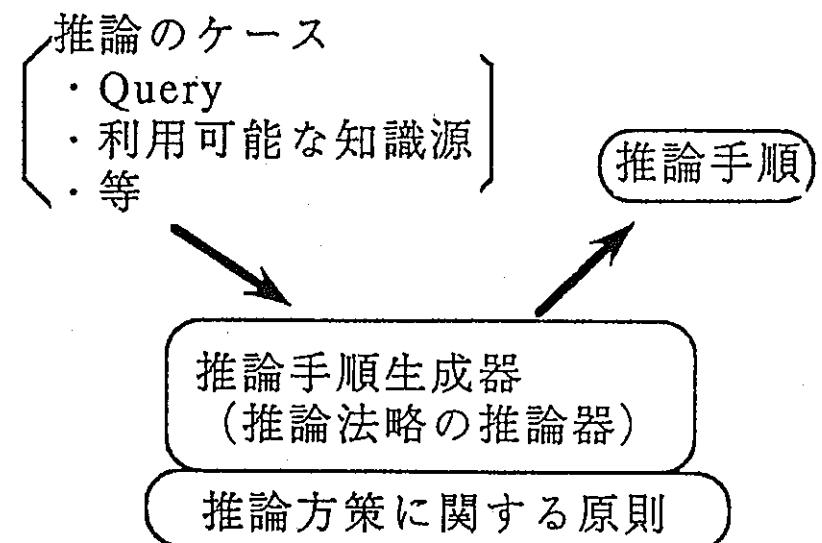
- 異常の検知-----送風機入口ベーン開度灯  
(表示灯)
- 監視対象項目確認-----主冷却器入口ベーン開度確認  
(初期異常関連項目)
- 対応策の検討-----実開度の確認を決定  
(初期異常原因関連)
- 操作手順の実施-----ベーン開度指示切り替え操作実施
- 操作の効果確認-----ベーン開度指示確認  
(操作の結果確認)
- 異常の裏付け確認-----Na 温度調節系プロセス指示メータ確認  
(初期異常関連確認)
- 対応策の検討-----マニュアル切り替えを検討  
(初期異常関連項目)
- 異常の検知-----「中性子束高」警報を確認  
(第2異常警報)
- 操作手順の実施-----警報操作ボタンを操作
- 監視対象項目確認-----出力線形出力確認  
(第2異常関連項目)
- 対応策の検討-----2次系温度回復の優先を決定  
(第1、2異常関連)
- 操作対象／手順の決定-----マニュアルへの切り替えと初期開度への設定を決定  
(目標と方法決定)



## 実施内容②: 高次推論手法の要件の整理

可能な一般化の程度（推論の方略に関する推論の実現性）  
の見極め

推論のケース	推論手順
A1	Procedure(p,q,r)
A2	Procedure(s,t,u)
B1	Procedure(a,b,c)
C1	Procedure(x,y,z)
C2	Procedure(f,g,i)
::::	::::



自律化の尺度

### 実施内容③：高次推論システムの設計／製作

②の検討結果に基づいてシステムの設計／製作を行なう。

日常経験されるような典型的な事象を対象にして、推論システムの評価／検証を行なう。

## 人員・予算計画

	H 6	H 7	H 8	H 9	H10
高次推論の事例調査					
高次推論手法の要件の整理					
高次推論システムの設計／製作					
評価・検証					
	1	1	1	1	1
人員（職員）	1	1	1	1	1
人員（客員）	0	1	1	1	1
予算（百万）	12	20	25	25	25

## 関連事項

実験炉部の協力の必要性

運転・保守の記録の紹介／開示

高次推論の過程の解釈（現実的か否かのチェック）

人工知能を専門に研究している機関との協力

共同研究（複雑な現実の適用対象↔推論理論、実装技術）

## 予想される困難

高次推論一般に計算コストが高い

仮説推論：ゴールを説明できる仮説命題の組み合わせの数

帰納推論：与えられた事例の共通点の組み合わせ

類推：適用できる可能性のある事例の数

他の手段で結果を検証する必要あり

# 適応機構の研究

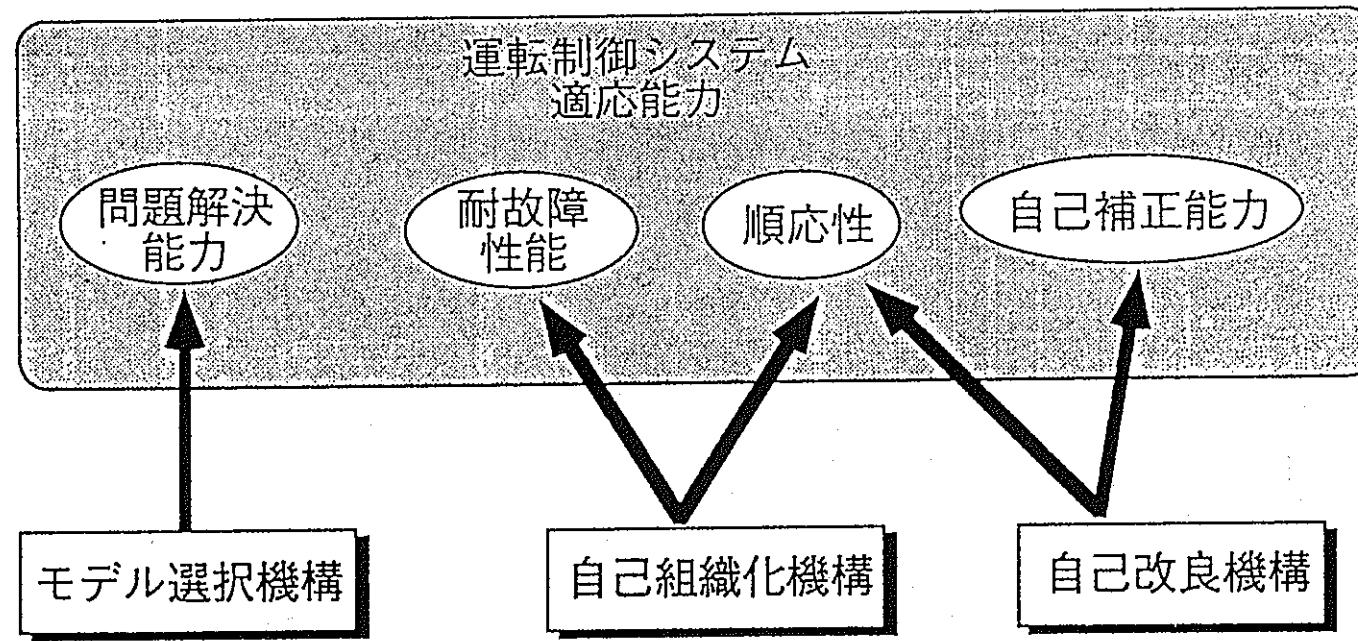
動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

技術開発部 先進技術開発室

佐伯 昭

平成 6 年度事前評価



---

## 開発目標

### モデル選択機構

対象の多面的モデル化およびそれに基づく推論機構の研究

- 21 -

### 自己組織化機構

システム内外の状況に応じた動的な機能構成形態の研究

### 自己改良機構

対象の特性変化への柔軟な適応機構の研究

## 効果予測

プラントの自律化促進

プラントの制御性能、運転効率の向上

大規模システムのモデル化、データベース化技術の高度化

-22-

事業団のプロジェクト技術への反映効果

知的運転制御システムの要素技術

→ 自己組織化 自己改良 大規模実時間知識ベース

原子炉施設、核燃料サイクル施設の運転制御監視技術への適用

平成6年度事前評価

## 国内外の現状レベル

多面的モデル化、自己組織化機構、自己改良機構とも  
基礎的な研究が主

適当な応用問題を模索中、一般化・普遍化には至らず



原子力分野をターゲットとした応用研究は希

---

## 当該評価対象期間以降の計画実施内容

### (i) モデル選択機構の研究

問題解決能力の向上 → プラントのモデル化手法の高度化

- ・多面的モデル化
- ・予測モデルの高度化

#### (1)開発計画

- |                |          |
|----------------|----------|
| ・多面的モデル構築、選択機構 | H 6～H 7  |
| ・予測モデル高度化      | H 6～H 7  |
| ・システム設計、試作、評価  | H 8～H 10 |

---

## (2) 実施内容

- ・多面的モデル構築、選択機構

### モデル化

同一の対象を複数の観点（マルチプルオントロジー）から  
モデル化する方法論の研究

### モデル選択

状況に応じて適切なモデルを選別する方式の研究

### モデル管理

複数観点のモデルの統一的管理方法の研究

## 多面的モデル

### モデル化

アブストラクション階層化モデル（ラスマッセン）

微視的／巨視的オントロジ

デバイス指向／プロセス指向

定性モデル／定量モデル .....

### モデル選択

運転員思考モデルに基づくモデル選択戦略の実現

モデル詳細度（グレインサイズ）の切り替え機構

### モデル管理

マルチプルオントロジーモデル群の異種モデル間  
関連づけ

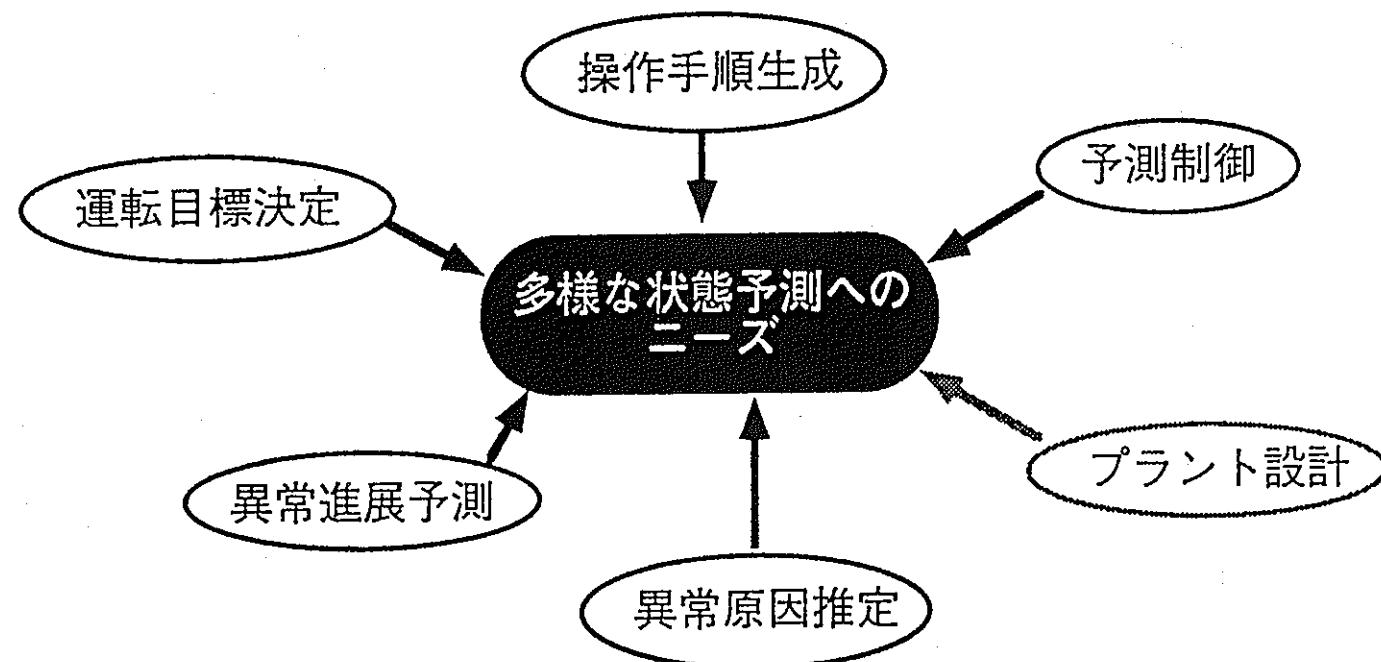
例：モデル群グラフ（モデル成立仮定による管理法）

## 研究課題

平成6年度事前評価

## ・予測モデル高度化

要求される精度で状態予測を可能とする予測モデルの構築  
方法論及びその実現法の研究

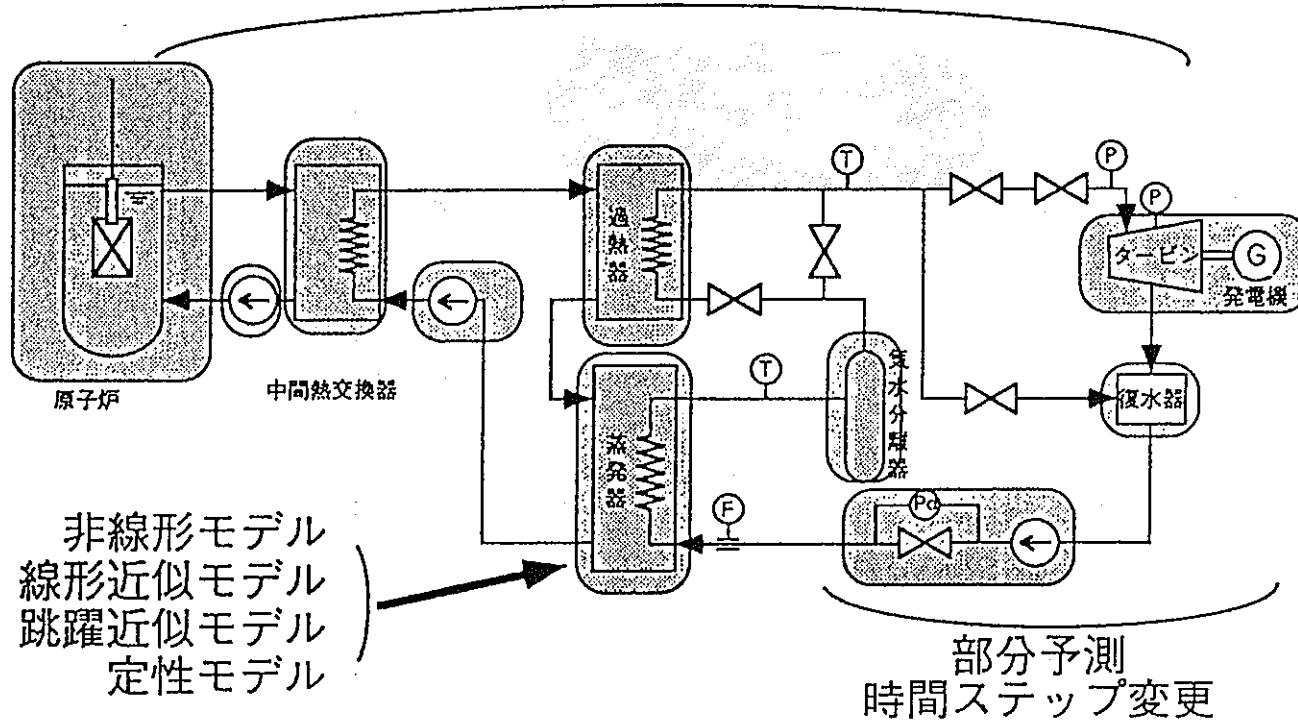


## 研究課題

### 分散型モデリング

独立処理可能なモデルを複数結合して予測モデルを構成する。

並列処理



ビルディングブロック型シミュレータの知見

平成6年度事前評価

---

## (ii) 自己組織化機構の研究

耐故障性能／環境順応性

### (1) 開発計画

- ・ 動的自己組織化 H 6～H 7
- ・ システム設計、試作、評価 H 8～H 10

---

---

## (2)実施内容

- ・動的自己組織化

- 異常エージェントの局所化の研究

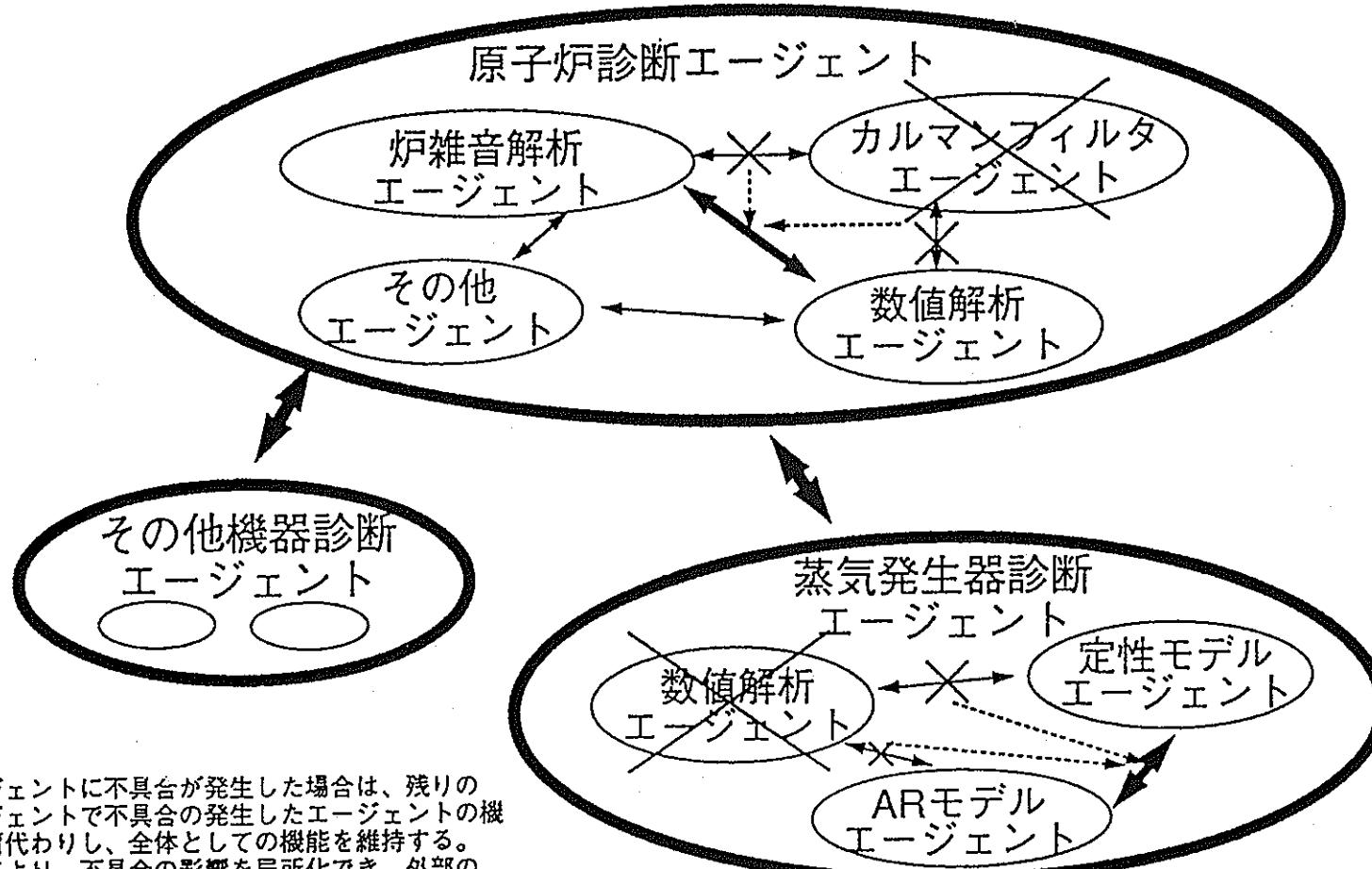
- エージェントの自己診断機能

- 異常波及の局所化を可能とするエージェント組織構成法

- 故障影響の外部へのマスク法

- 健全エージェントによる異常エージェント補完機構の研究

- 相互補完可能なエージェント組織構成



エージェントに不具合が発生した場合は、残りのエージェントで不具合の発生したエージェントの機能の肩代わりし、全体としての機能を維持する。これにより、不具合の影響を局所化でき、外部のエージェントは、不具合の影響を受けない。

### 自己組織化の概念

## 動的自己組織化概念図

平成 6 年度事前評価

---

### (iii) 自己改良機構の研究

自己補正能力／環境順応性 → 自己改良機構による実現

-32-

#### (1) 開発計画

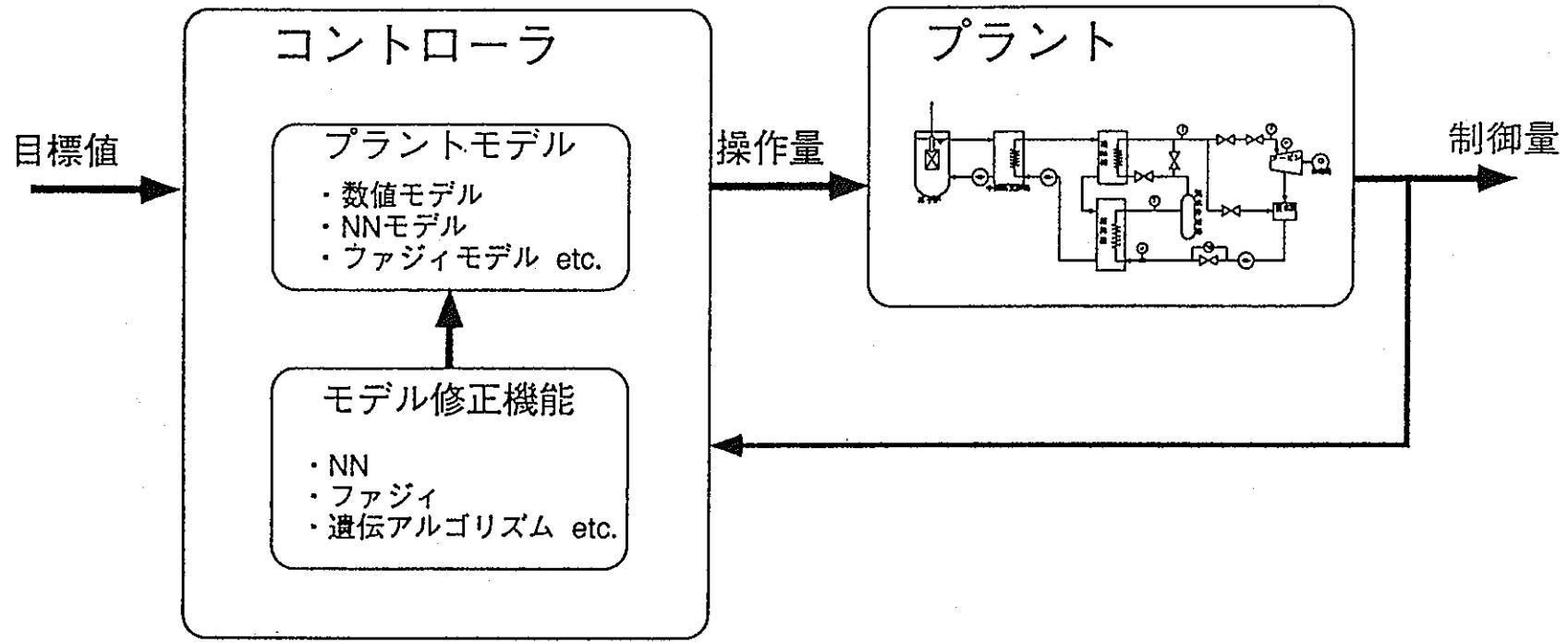
- ・自己改良方式に関する概念検討 H 6
- ・自己改良方式 H 6～H 7
- ・システム設計、試作、評価 H 8～H 10

---

平成 6 年度事前評価

## (2) 実施内容

- ・自己改良方式に関する概念検討  
学習法、自己改良方式の調査、概念形成
- ・自己改良方式
  - ・ニューラルネットモデル等の学習機能を利用した  
自己改良機構の研究  
　　ニューラルネット駆動型ファジー制御  
　　ニューラルネットによる最適予測適応制御 等
  - ・ニューラルネットワーク構造の変更、ファジールールの  
調整への遺伝的アルゴリズムの適用



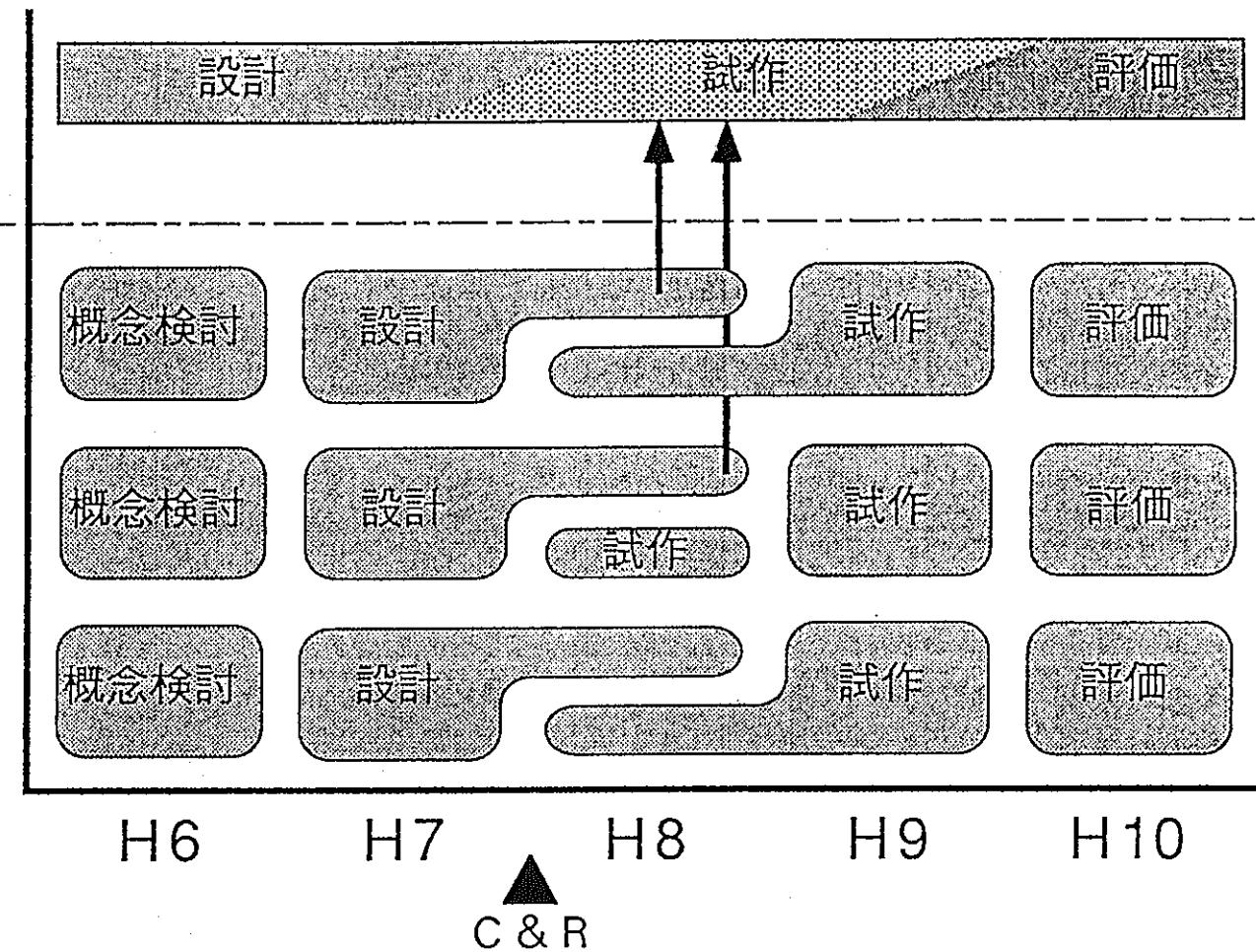
## 制御における自己改良機構概念図

知的運転制御システム

モデル選択機構

自己組織化機構

自己改良機構



## 適応機構研究スケジュール

平成6年度事前評価

---

---

# 知的運転制御システムの開発

- 36 -

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

技術開発部 先進技術開発室

佐伯 昭

---

---

平成 6 年度事前評価

---

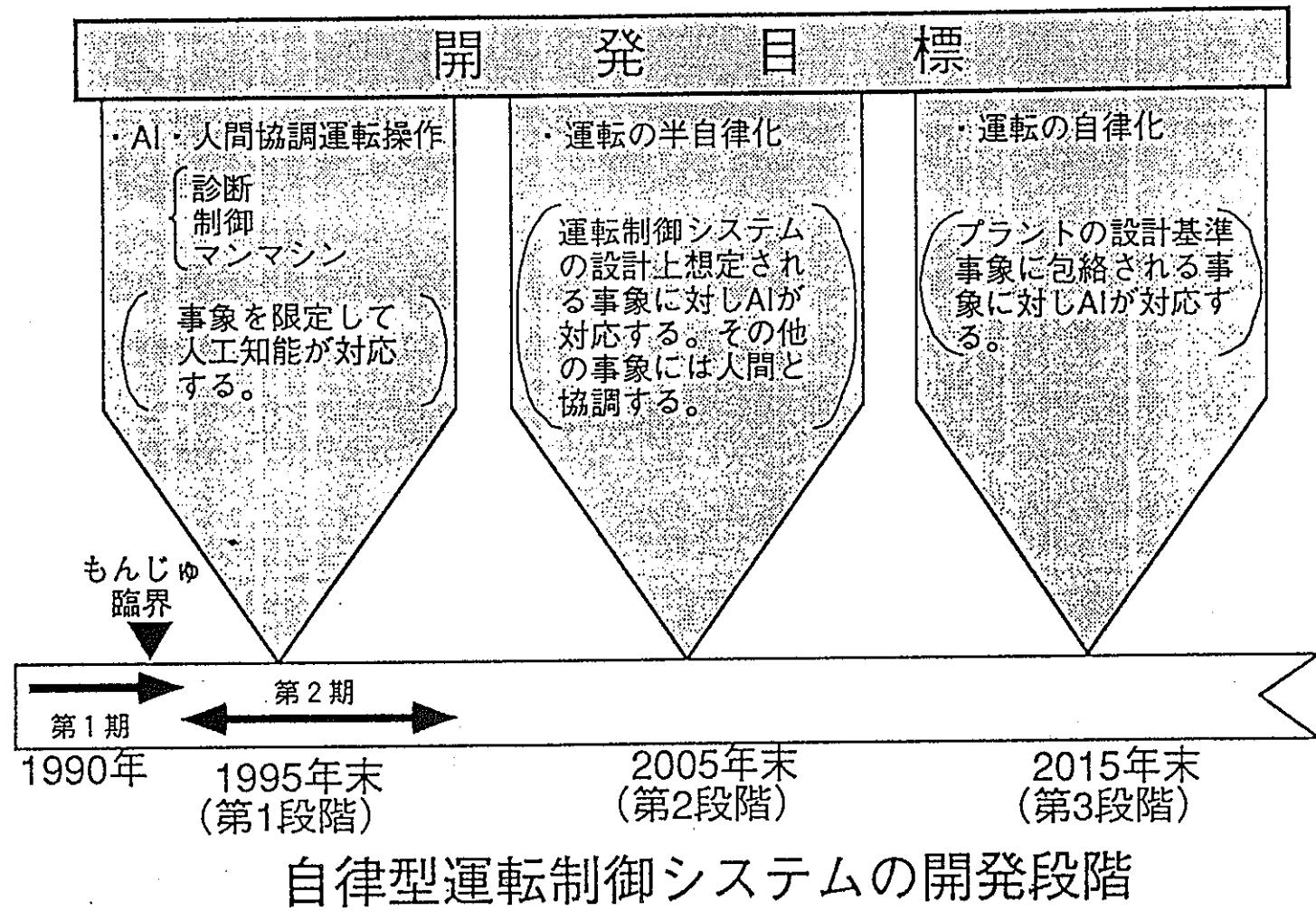
---

## 開発目標

自律型運転制御システムの開発  
プラント自律規範の実現性評価

大規模実時間知識ベースシステムの開発  
知識ベースシステムの実規模プラントへの適用性評価

点検保守システムの開発  
点検保守用ロボットシステムとの協調システムの実現



## 効果予測

自律型運転制御システムの開発

大規模プラントの運転制御システムの自律化・高度化に寄与

大規模実時間知識ベース技術の確立

大規模プラントにおける知識ベースシステムの実用化促進

点検保守機能の開発

保守作業の自動化・効率化に寄与

## 事業団のプロジェクト技術への反映効果

運転制御と保守作業を統合した運転制御技術

+

実規模を想定した実時間知識ベース処理技術

↓

次世代炉の設計

原子炉施設、核燃料サイクル施設の運転制御監視技術への適用

事業団保有のデータベースの高度集積化

## 国内外の現状レベル

通産省補助事業	マンマシンシステム（運転支援）
	知的保守作業システム（保守支援）
	セイフティーサポートシステム（保守支援）
米国	ORNL ACTO
カナダ	AECL オペレータコンパニオン

運転員・保守員の支援が主眼

---

---

## 知的運転制御システム

制御、運転操作も A I で実行

運転操作、保守を統合したシステム

実規模プラントを想定した大規模実時間知識ベースの開発

---

## 当該評価対象期間以前の進捗状況

### 自律型運転制御システムの開発

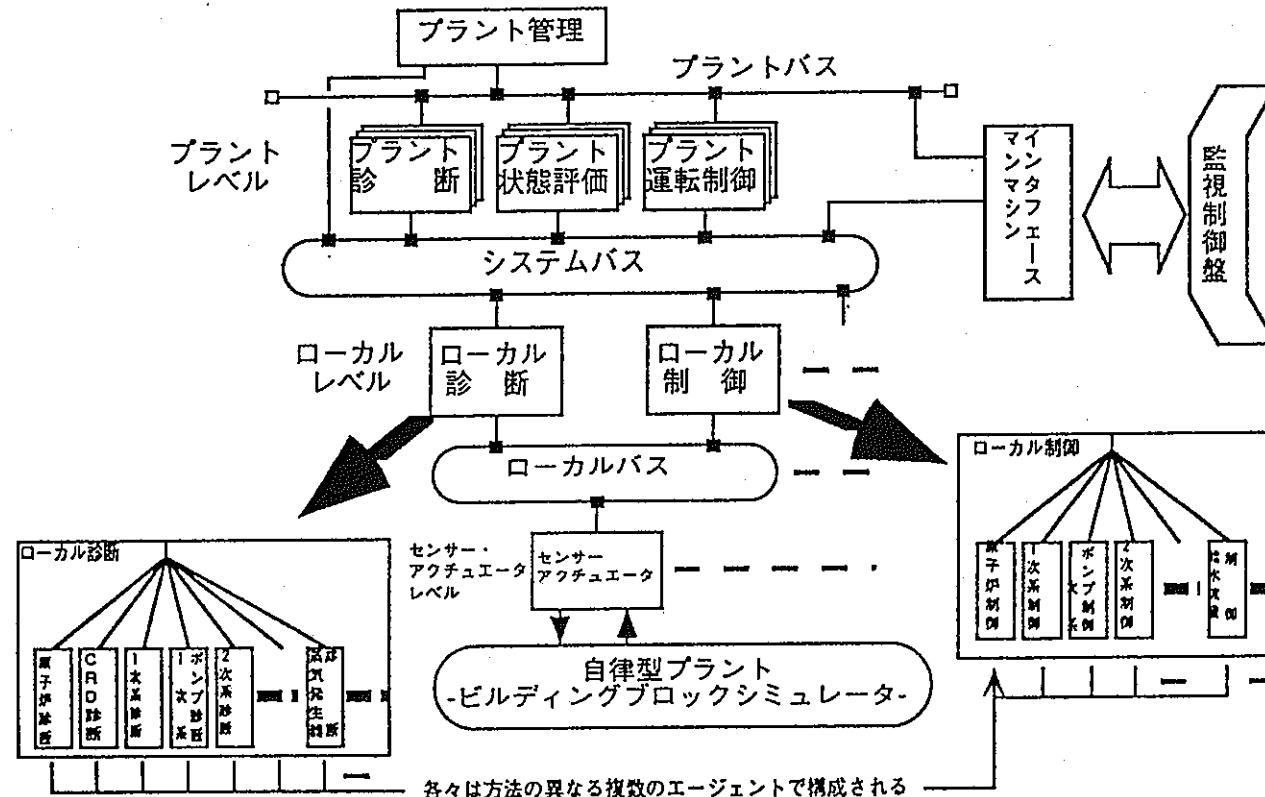
自律型運転制御システムの概念を構築 (→自律規範)

階層型マルチエージェントシステムの提案

事象を限定したプロトタイプシステムの試作 (～平成 6 年度)

# 当該評価対象期間以降の計画実施内容

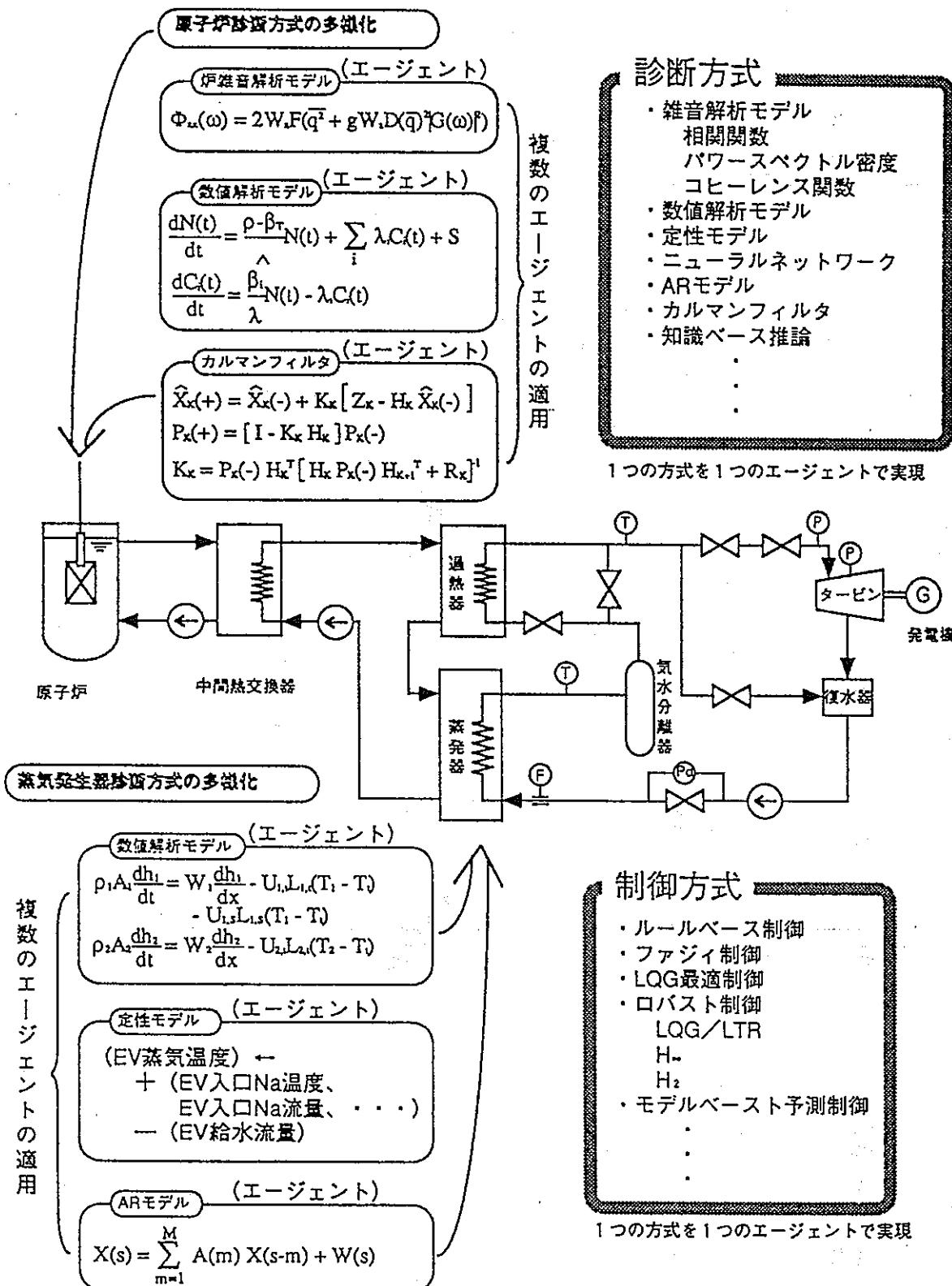
## (i) 自律型運転制御システムの開発



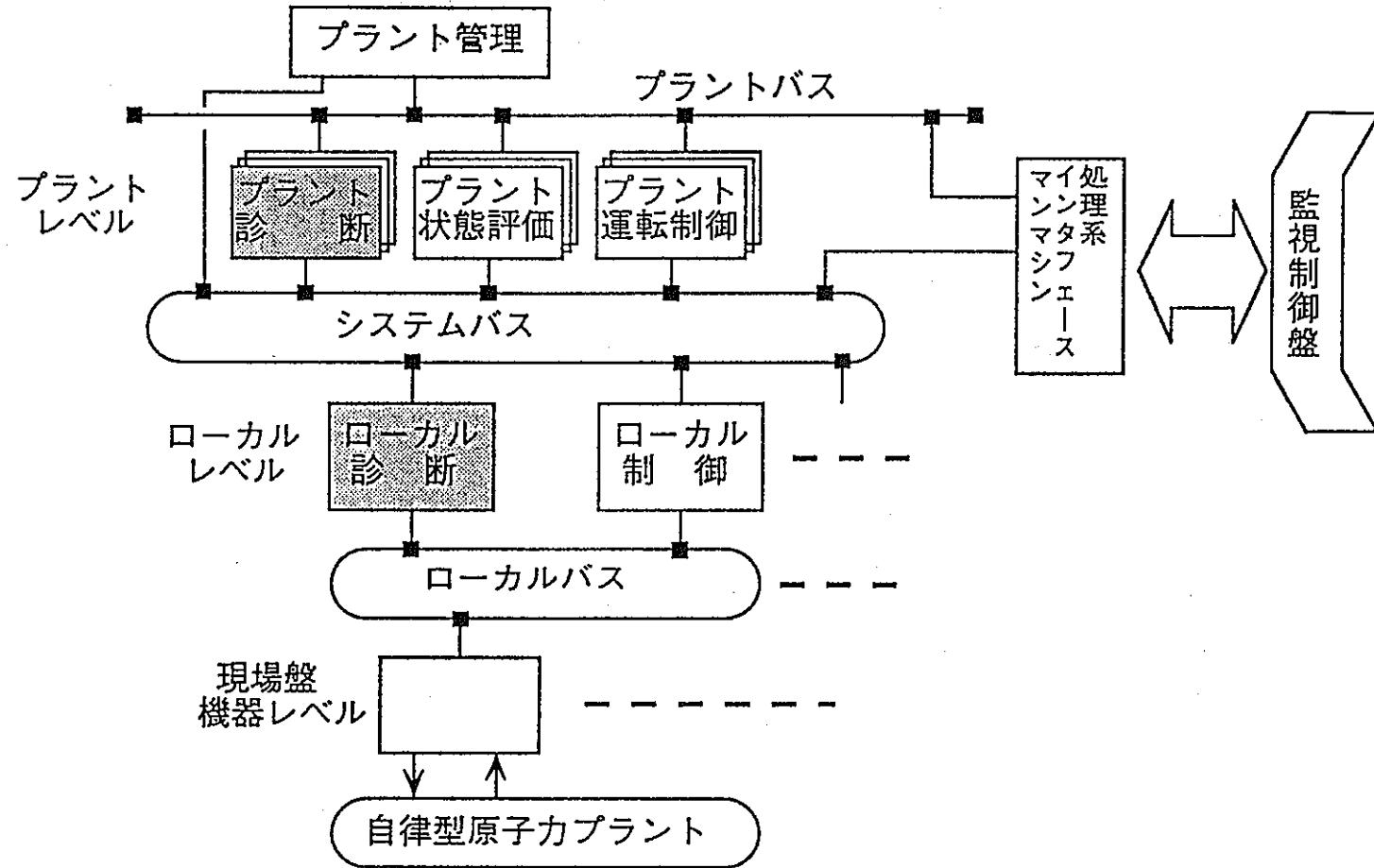
自律分散システム概念図

平成6年度事前評価

# マルチエージェントによる方式の多様化



平成6年度事前評価

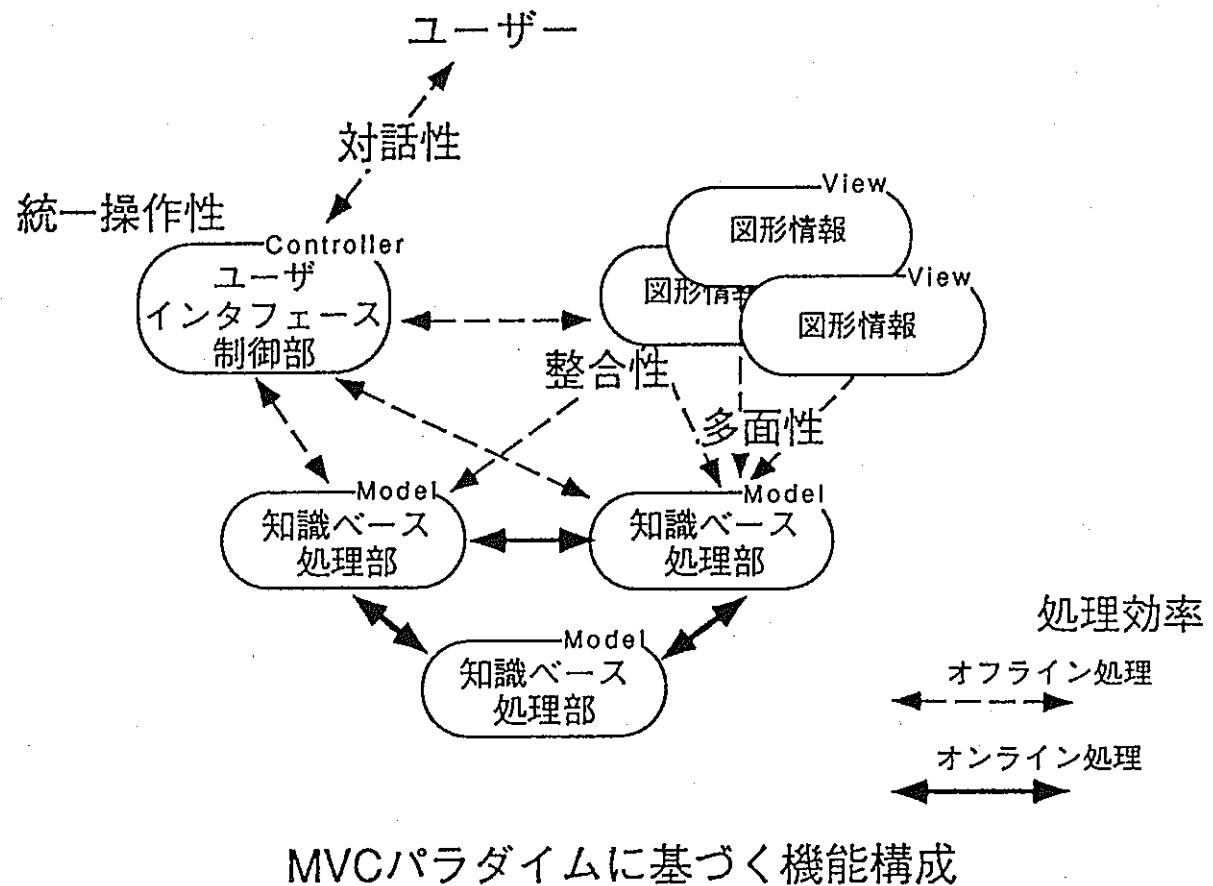


運転制御システムプロトタイプシステム構成図

平成6年度事前評価

## 設計方針

- (1) 対話性
- (2) 統一操作性
- (3) 多面性
- (4) 整合性
- (5) 処理効率



## 知識ベース構築支援機能

平成 6 年度事前評価 =

---

---

## (1)開発計画

個別エージェント開発	H 6～H 7
自律化機構設計	H 7
プロトタイプシステム設計	H 8
プロトタイプシステム製作	H 9
プロトタイプシステム評価	H 10

## (2) 実施内容

### ・ 個別エージェント

マルチエージェントシステムを構成するエージェント個々に実装する診断処理、制御処理を開発する。

プロトタイプシステムで開発したエージェントの拡張、および要素技術研究で開発した新規方式の追加

### 研究課題

NN制御、定性モデル診断、定性シミュレーション、NDF、ウェーブレット、フラクタル、カオス、ファジー制御 等

---

- ・自律化機構

## 方式多様化の研究

同一の対象に原理の異なる複数の方式を適用する

—50—

### 研究課題

#### 方式の選別指標

(直交性規範：補完関係、補強関係、等)

マルチプルオントロジーに基づくモデル化 等

## 合意形成法の研究

複数の方式の推論結果を統合する

### 研究課題

意思決定論の適用性検討

解の信頼性、獲得コスト（計算機資源、計算時間等）等

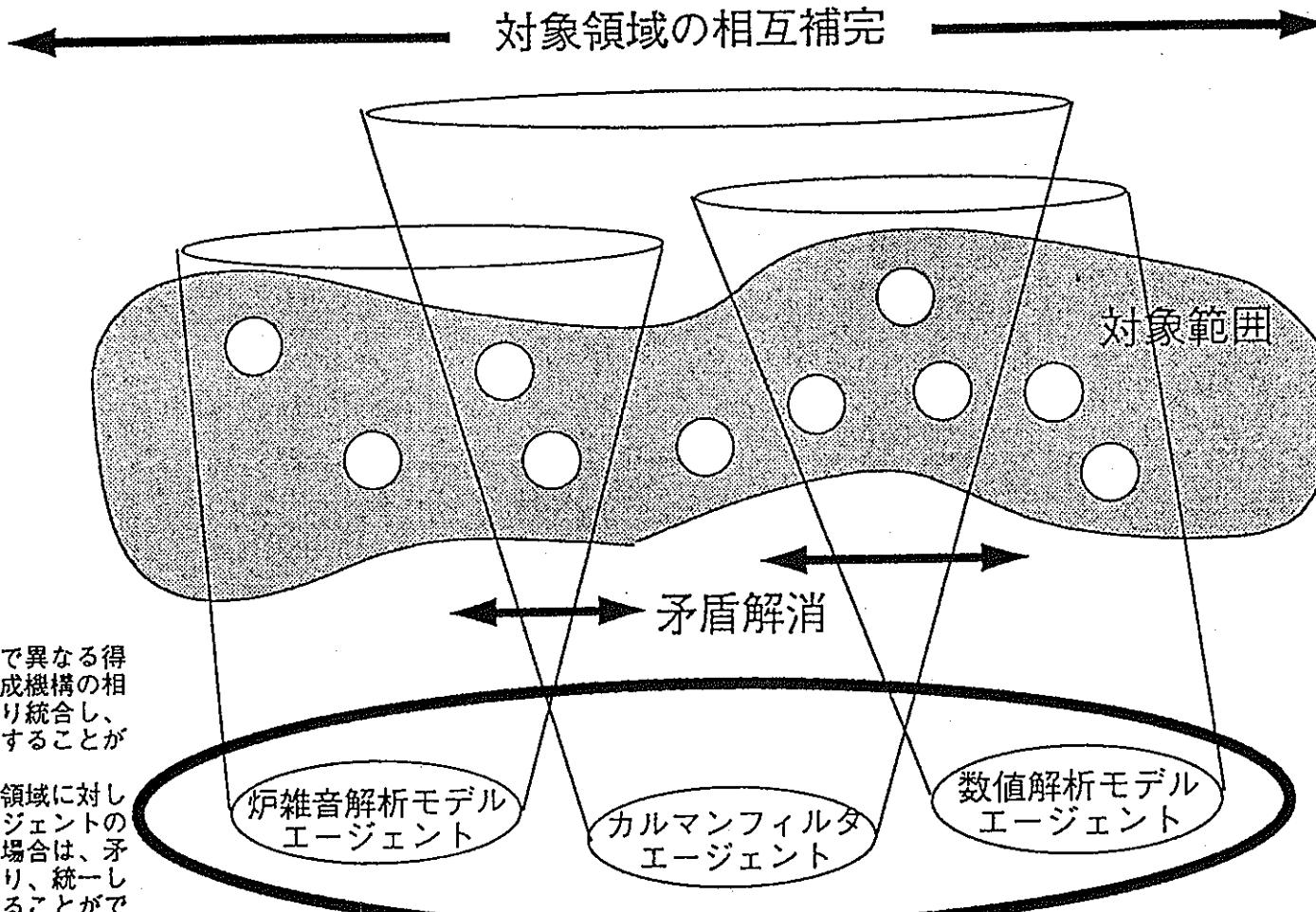
の合意形成のための指標の確立

矛盾結果の回避

制御戦略選択機構

（サブサンプション機構、知識ベース制御等）

各エージェントで異なる得意対象を合意形成機構の相互補完機能により統合し、対象範囲を拡大することができる。  
一方、重複する領域に対して矛盾したエージェントの結果が得られた場合は、矛盾回避機能により、統一した結論を獲得することができる。



## 原子炉診断における合意形成概念

平成 6 年度事前評価

---

---

- ・システム実装機構

マルチエージェントシステムの実装機構の設計

### 研究課題

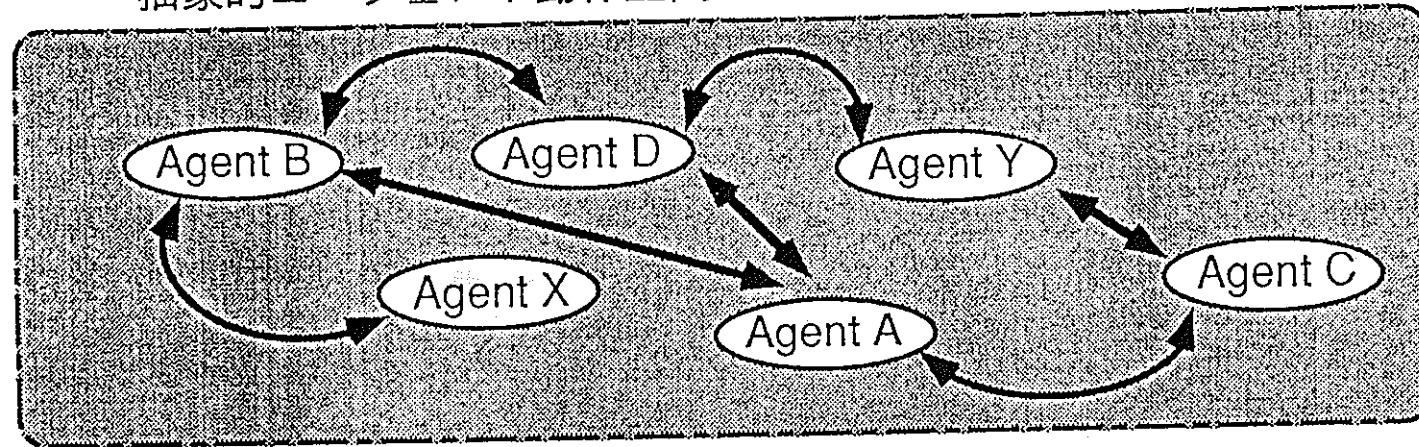
協調的タスク（順次処理、並列処理、非同期処理、サブサンプション等）の実行管理機構

実行計算機に依存しない透過的実行機構

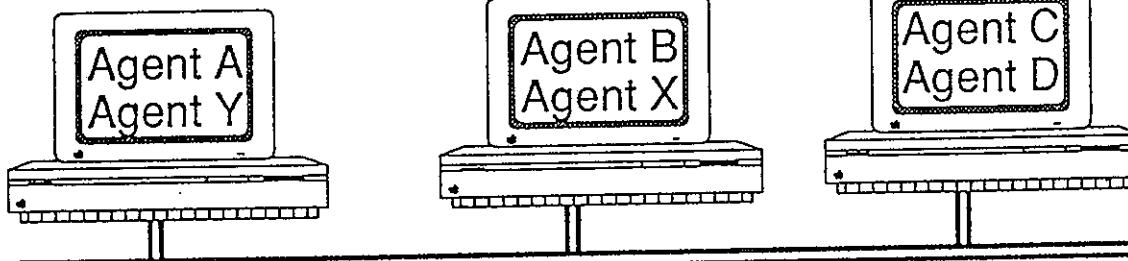
エージェント間通信プロトコル 等

適応機能研究の自己組織化機構の実装機構の設計

抽象的エージェント動作空間



- 54 -



実エージェント動作環境

透過的実行機構例

平成 6 年度事前評価 二

### (3)当面の課題

#### ・個別エージェント開発

異常診断エージェントのライブラリ拡張

制御エージェントのライブラリ拡張

#### ・自律化機構研究

診断方式の多様化を適用し、実現性の評価を行う。

---

## (ii) 大規模実時間知識ベースシステムの開発

### (1) 開発計画

基本概念設計	H 6
要素技術開発	H 6～H 7
プロトタイプシステム設計	H 8
プロトタイプシステム製作	H 9
プロトタイプシステム評価	H 10

---

平成6年度事前評価 ==

---

---

## (2) 実施内容

- ・ 大規模実時間システム概念設計

原子力プラント運転制御、保守作業に適用可能な大規模実時間知識ベースとして具備すべき要件を摘出する。  
多面的モデリングの導入を図る

## 大規模知識ベース構築方法：

大量のデータ入力を容易に実現する方法を検討する。

具体的には、

既存データベースの利用法（設計情報、運転情報、保守情報）を検討する。他部門と連携して実施する。

オンラインデータ更新機能として、事例ベース推論、記憶ベース推論等の経験的知識の蓄積法、再利用法を確立する。

---

- ・大規模知識ベース要素技術の研究

自律型プラントにおける大規模データベースとして具備すべき要素技術を研究する。

—5—  
知識表現：

原子力プラントの設計、運転、保守等、原子力プラントの全ライフサイクルをカバーできる多様な知識表現を確立する。

テキストデータ以外のマルチメディアとの親和性の高い知識表現を確立する。

---

---

## データベース技術：

大規模データに適した多様な知識表現が可能な高水準データベース実装方法（演繹データベース、オブジェクト指向データベース等）を選定する。

大規模データベースの蓄積に適したデータの分散共有化機構を選定する。

非サーバークライアント型分散共有機構  
複数エージェントの同時アクセス性能  
計算機非依存性 等

知識整合性維持機構の研究

---

- ・ 実時間知識ベース処理技術の研究

知的運転制御システムの実時間処理を達成するために必要な以下のような要件を実現する機構を研究する。

- 応答時間保証（例：マルチエージェントによるタスク分散）
- 同時タスク処理
- 割り込み拒否
- 動的プライオリティ制御 等

- ・ 大規模実時間知識ベース機構の研究

大規模知識ベースと実時間処理の両立する機構

---

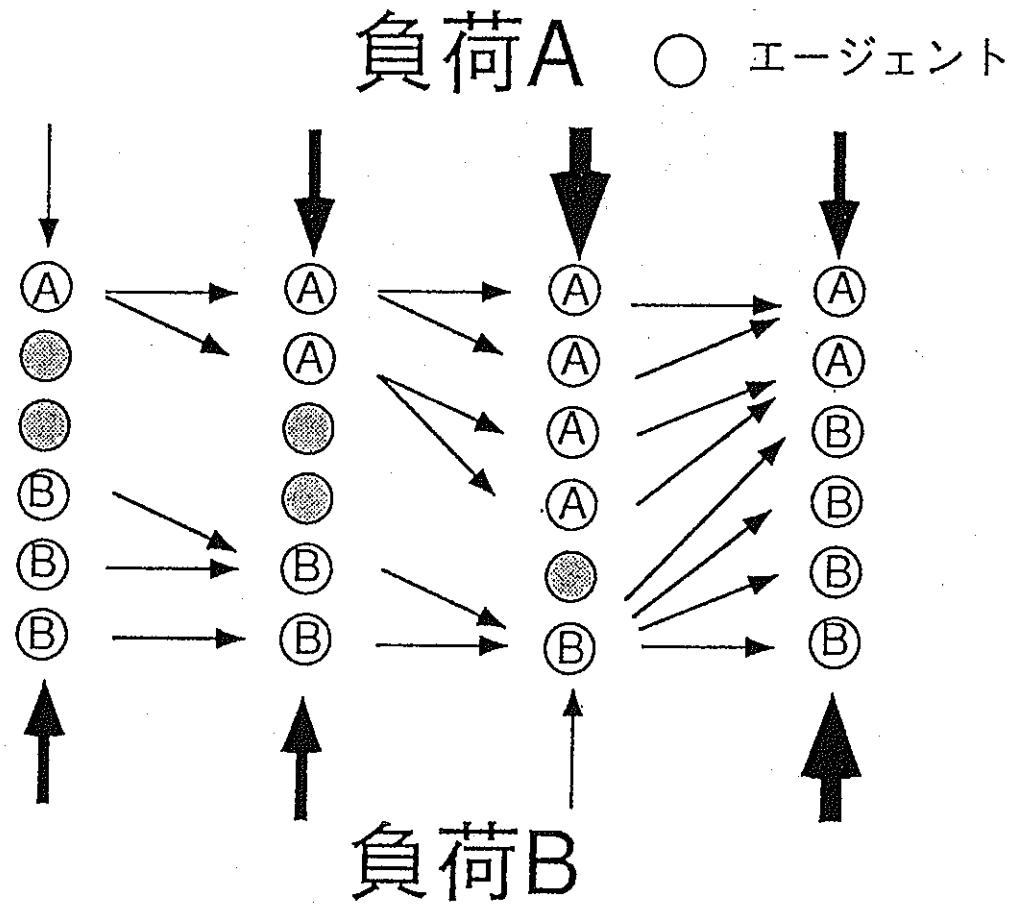
## 応答時間保証機構実現例

タスク負荷に応じたエージェント分散、統合化による  
応答時間保証機構

- 62 -

### 負荷の変化例

- ・モデル粒度の変更に伴う推論処理負荷
- ・予測モデルの変更に伴う計算負荷
- ・異常発生時の故障診断に伴う推論負荷



応答時間保証機構概念図

平成6年度事前評価

---

### (3)当面の課題

- ・概念設計

原子力プラント等の産業プラント向けの大規模知識

ベースの事例調査、研究

動燃保有のプラント各種データベースの調査

- ・要素技術開発

- ・データベース技術

汎用性のあるデータベース管理システムの選定

プラント全ライフサイクルに適用可能な知識表現の選択

---

---

### (iii) 点検保守システムの開発

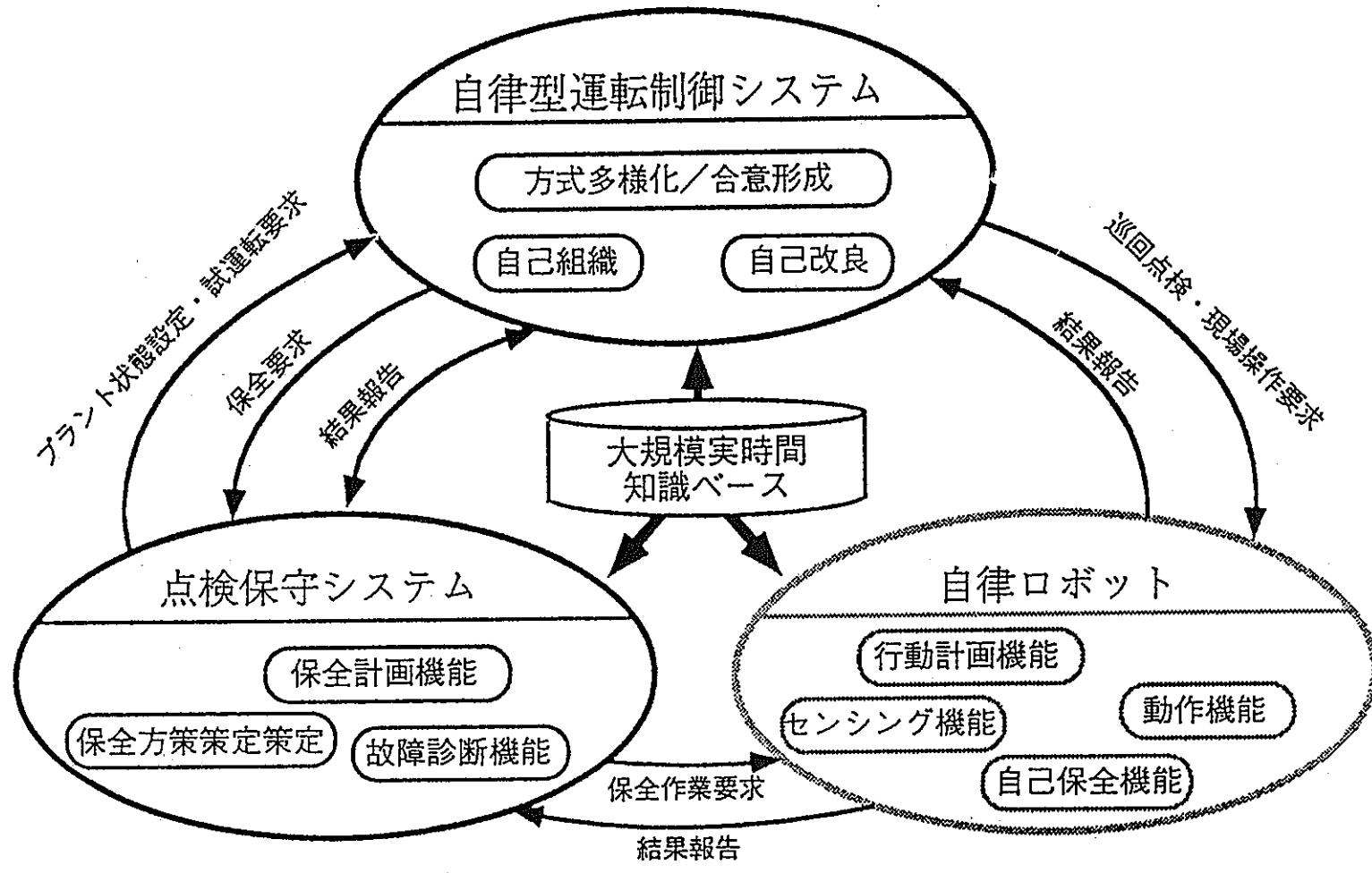
#### (1) 開発計画

基本設計	H 6
要素技術開発	H 7
プロトタイプシステム設計	H 8
プロトタイプシステム製作	H 9
プロトタイプシステム評価	H 10

---

---

平成 6 年度事前評価



## 知的運転制御システム

平成 6 年度事前評価

---

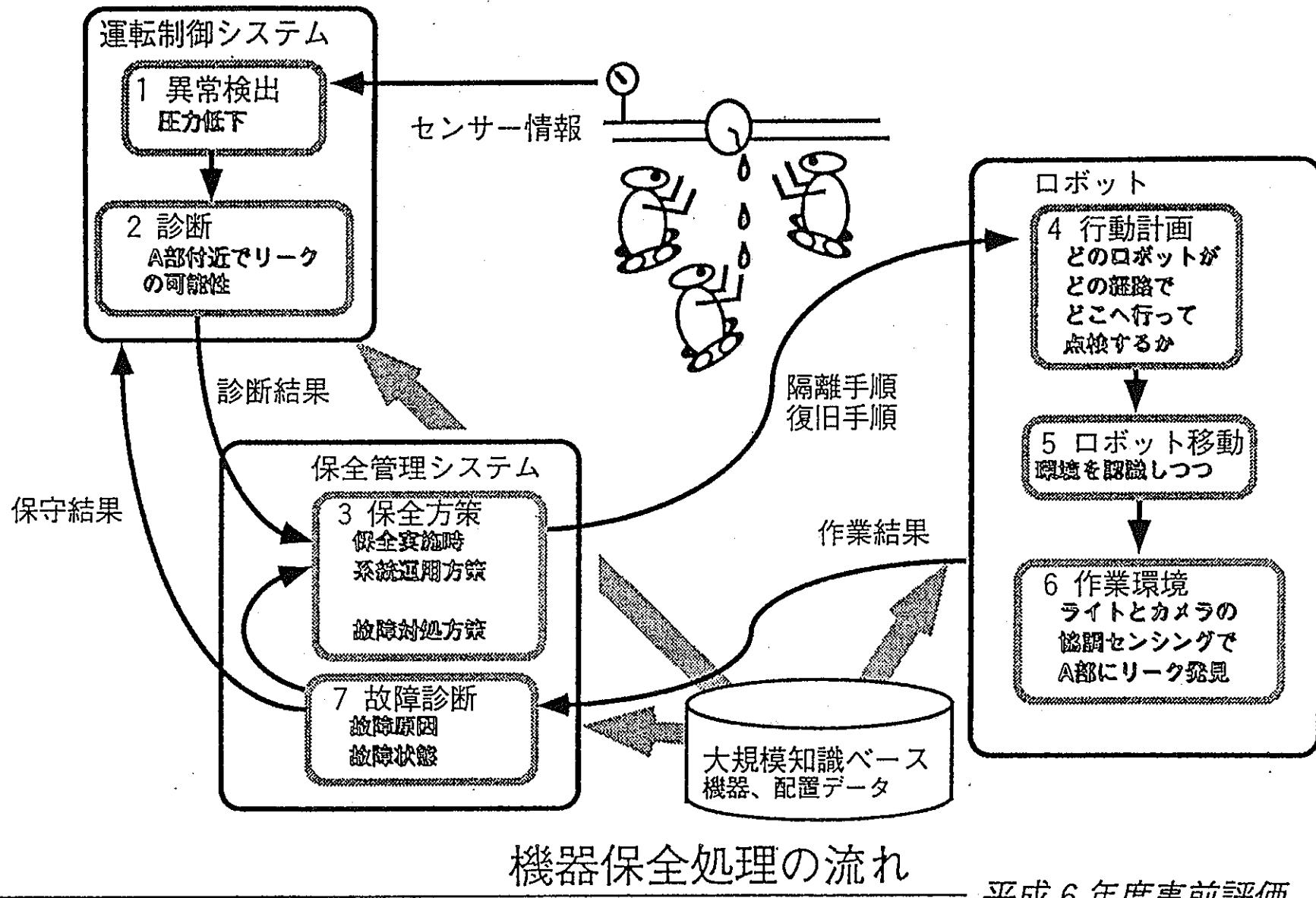
## (2)実施内容

- ・点検保守システム基本設計

自律型プラントにおける運転制御システム、保全管理システム、自律ロボットシステムとの機能分担を明確化する。  
保全処理に関連する保全計画機能、保全方策策定機能、  
ロボット行動計画機能それぞれの機能分担を明確化する。

- ・故障原因診断機能

故障機器隔離後の異常原因の診断法の検討



---

- ・保全方策策定機能

保全計画、及びロボットからの作業報告に基づき  
保全方策を策定する。

- ・ロボットからの点検結果の評価、管理方式

保全結果の記録法、履歴データとの比較法

保全結果に基づく保全方策の再構築 等

- ・点検保守のための系統運用手順策定及び監視

- ・ロボット行動計画機能との機能分担・通信プロトコル設計

- ・運転制御システムとの機能分担・通信プロトコル設計

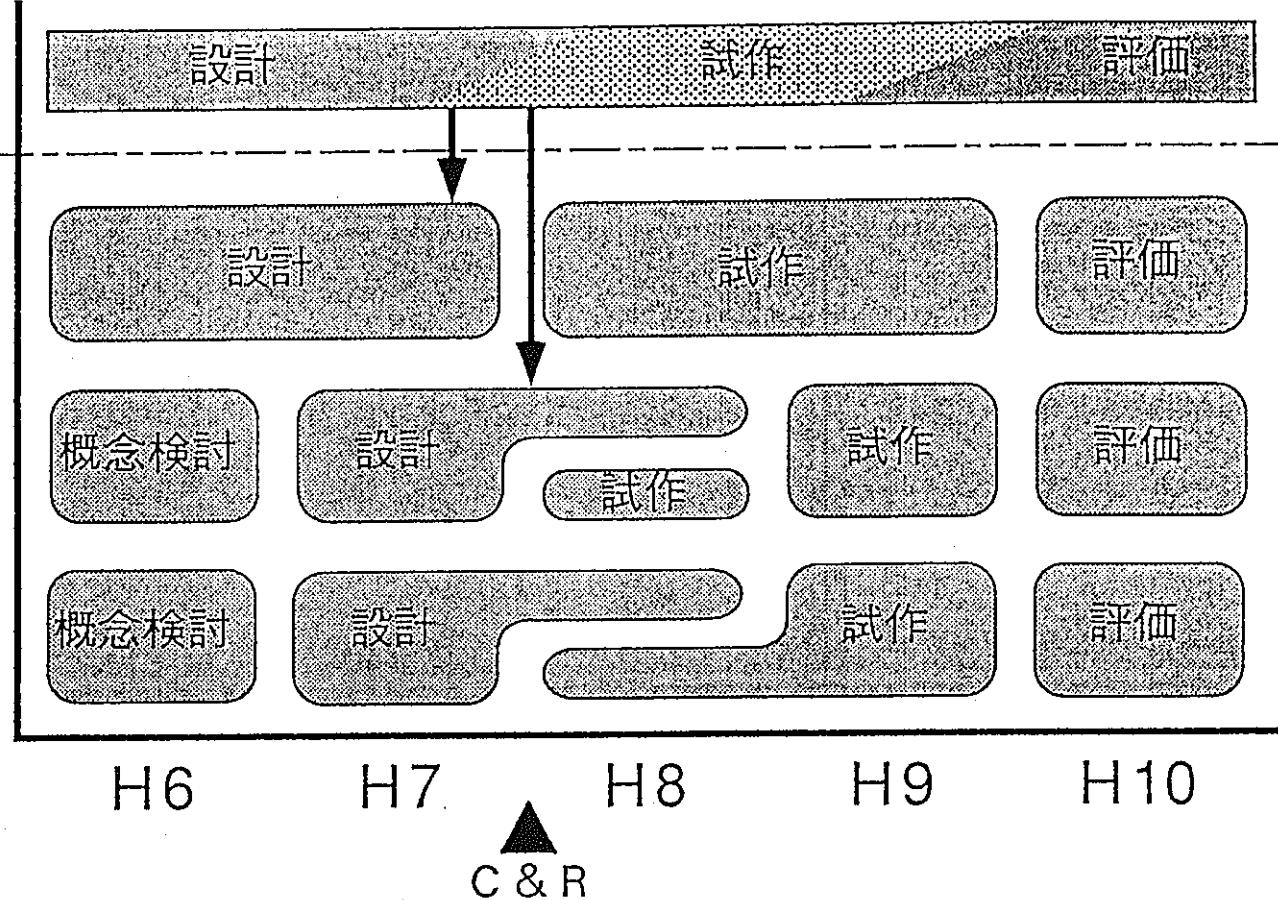
- ・自律ロボット協調動作エミュレーション環境

## 適応機構の研究

自律型運転制御  
システム

大規模実時間知識  
ベースシステム

点検保守システム



知的運転制御システム研究開発スケジュール

平成 6 年度事前評価 =

平成5年12月14日  
中間評価用資料

# 基盤原子力用材料データフリーウェイの開発

大洗工学センター 機構開発部  
先進技術開発室

加納茂機、上野文義

## 発表内容

- A. はじめに
- B. データフリーウェイ構築状況
- C. 3機関の協力による利点
- D. 各機関の独自の研究例
- E. おわりに

## A. はじめに

目的 基盤原子力材料研究成果の相互利用システム（データフリーウェイ）の開発  
金材技研、原研、動燃が、それぞれに基盤研究成果の材料データベースを構築し、共同して相互利用システムを確立する。

- 1 背景と意義
- 2 相互利用システムの概念とユーザーインターフェイス
- 3 データフリーウェイ構築の年次計画
- 4 データフリーウェイ構築のための組織 (研究交流の場)

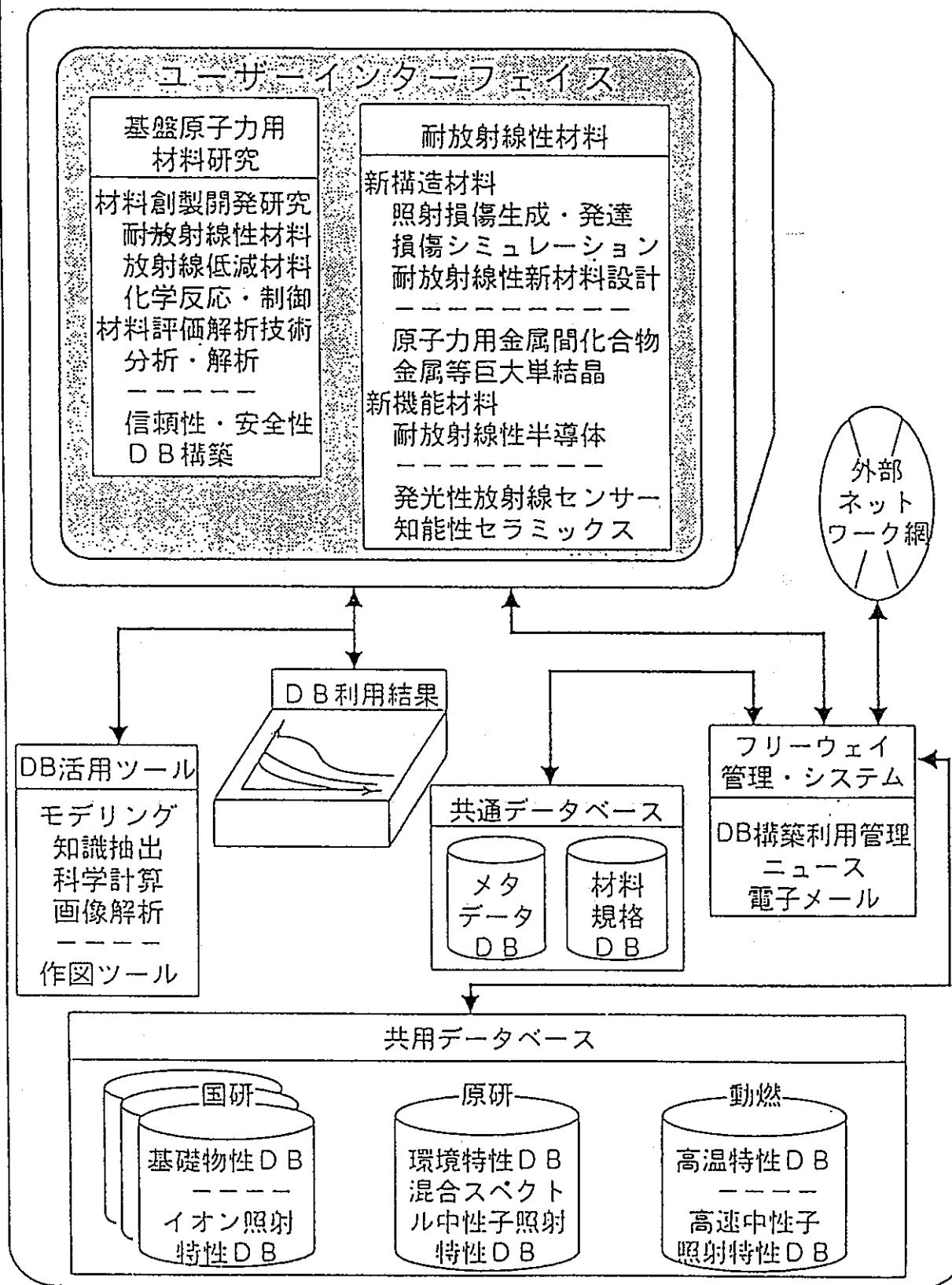
# 背景と意義

原子力用材料データベース構築に関する各種の調査報告  
「データベース事業は、国 の 原子力研究開発の基盤となるので、推進すべき」と提言

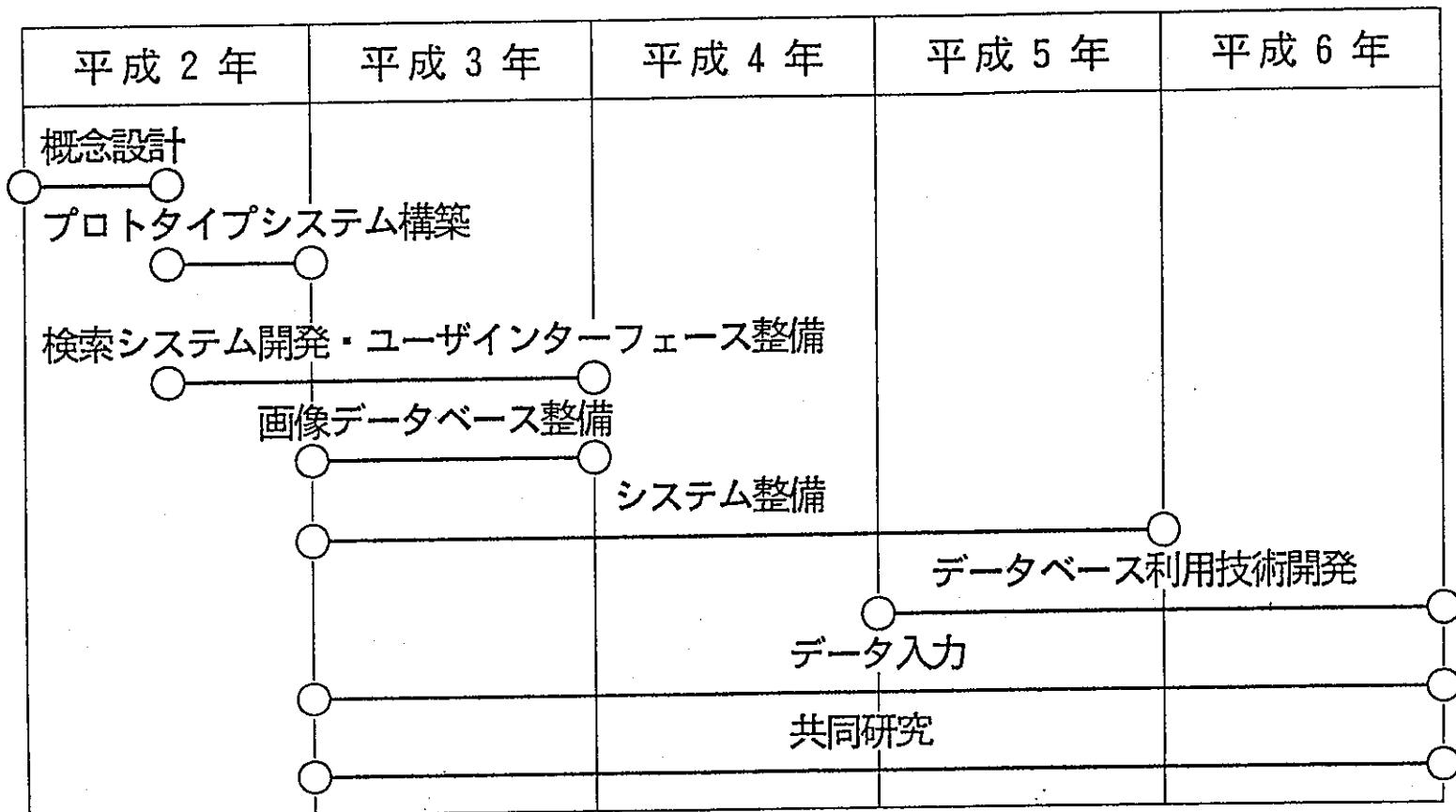
## 調査報告の例

- 昭和 62 年度 「原子力開発利用に関わるデータベースの整備」 (中沢主査／東大)
- 昭和 63 年度 「原子力材料技術開発計画」 (澤岡主査／東工大)  
" 材料設計に必要なデータ、各種環境・強度特性データ及び知識を体系化しデータベースを構築・整備して、研究機関間のリンク化を図る必要がある。"
- 昭和 63 年度～平成元年度 「基盤技術創生のための原子力用材料データベース構想」 (岩田主査／東大)  
" 基盤原子力用材料研究成果をデータベース化し、これを相互に利用できるシステムを通して、データの相互補完や相互利用による材料研究の効率的推進を図る必要がある。"

# 相互利用システムの概念と ユーザーインターフェイス



# データフリー ウェイ構築の年次計画



## データフリーウェイ構築のための組織 (研究交流の場)

A. データフリーウェイ共同研究協議会 (3機関の共同研究契約)	目的	構築・運営上の基本問題の検討
	委員構成	主査は3機関の研究担当部の 部長の持ち回り 3機関の研究担当者 3機関の事務管理担当者 科技庁技振課担当者
	オブザーバ	
	開催頻度	年1~2回
B. データフリーウェイ技術検討会 (データフリーウェイ構築連絡会 から発展)	目的	技術的な問題を討議
	委員構成	岩田主査(東大) 3機関の幹事 計量研、船舶研 J I C S T、新日鉄、の委員
	開催頻度	年3~4回
C. 3機関の打ち合わせ会(幹事会)	目的	システム構築等の討議
	構成委員	研究担当者
	開催頻度	月1~2回

システムへの参加 参加機関間で相互利用のための覚書を交わす

## B. データフリーウェイ構築状況

- 1 システム構築上の課題と対策・目標
- 2 システム整備の計画と進捗状況
- 3 システムの接続状況
- 4 システムの概要
- 5 データベースの構造
- 6 システムの画面
- 7 データ入力状況

# システム構築上の課題と対策・目標

## 課題

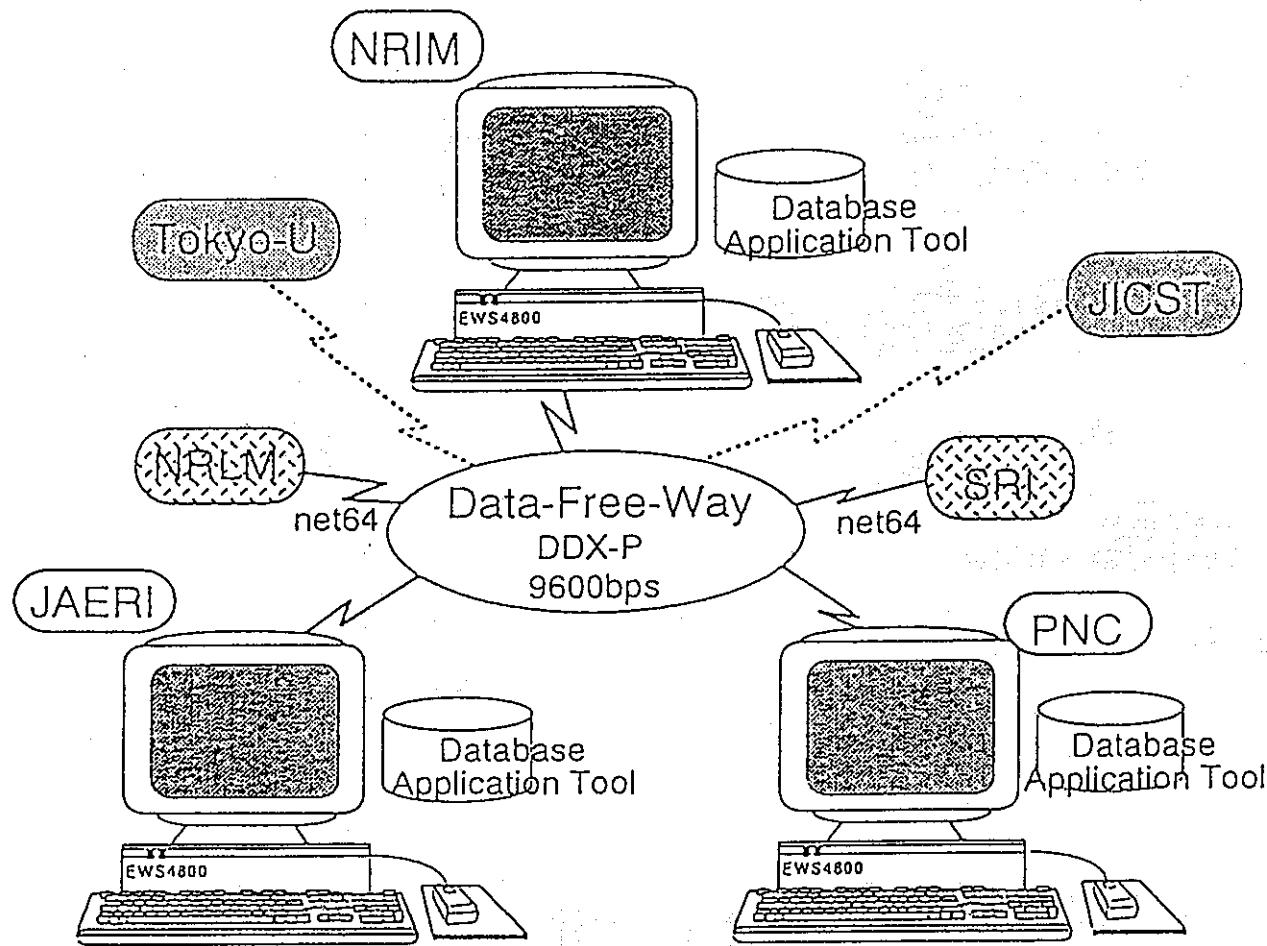
## 対策・目標

- |                    |   |
|--------------------|---|
| 1. システムの整備         | ・分散型データベースの構築<br>・多機関間のネットワーク網の整備         |
| 2. データの収集          | ・既存のデータベースや文献から収集<br>・基盤原子力用材料研究成果から収集    |
| 3. ユーザ・インターフェースの開発 | ・メニュー選択による検索 (SQL自動生成)<br>・材料に関する用語の辞書の整備 |
| 4. 利用技術の開発         | ・日本語と英語による利用環境の整備<br>・データベース活用ツールの作動環境整備  |
| 5. 多機関の協力          | ・3機関間の共同研究契約の締結<br>・研究交流の場を通じて協力を得る       |
| a. 研究成果のデータベース化    |   |
| b. 材料情報の相互利用       |   |
| a. 汎用性、専門性の高いデータ   |   |
| b. 先端的材料データ        |   |
| a. 容易な検索           |   |
| b. 知的検索            |   |
| a. 言語環境            |   |
| b. 新たな価値の生成と新知見の獲得 |   |
| a. システム構築の体制       |   |
| b. 利用の拡大           |   |

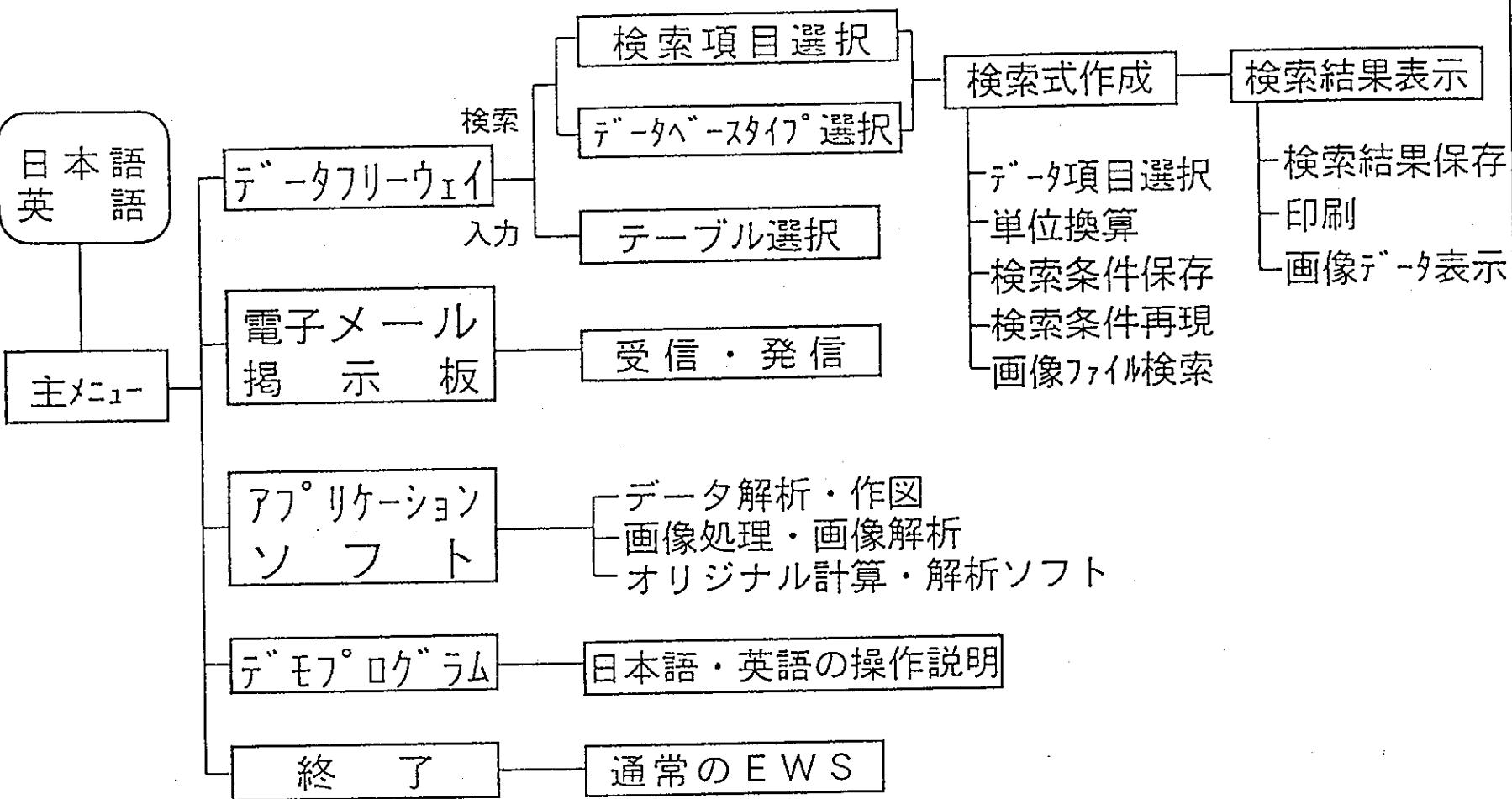
## システム整備の計画と進捗状況

年 次	計 画	進 捗 状 況
平成 2 年度	概念設計 プロトタイプシステム構築 検索システム開発	概念設計・ネットワーク管理システム導入 プロトタイプシステム構築 検索システム開発着手・試行システム整備
平成 3 年度	ユーザインターフェース整備 画像データベース整備 データ入力 共同研究契約締結	データ入力・作図出力機能整備 画像データベース機能整備(PNC) データ入力開始 共同研究契約締結・開始
平成 4 年度	システム整備 データ入力	データ入出力支援システム開発着手(JAERI) 検索画像簡易表示機能等整備 データ入力継続
平成 5 年度	システム整備 データベース利用技術開発 データ入力	データ入出力支援システム開発・整備 システム操作性の見直し 計量研・船舶研・JICSTの接続 データ入力継続
平成 6 年度	データベース利用技術開発 データ入力	アプリケーション機能整備(予定) データ入力継続(予定)

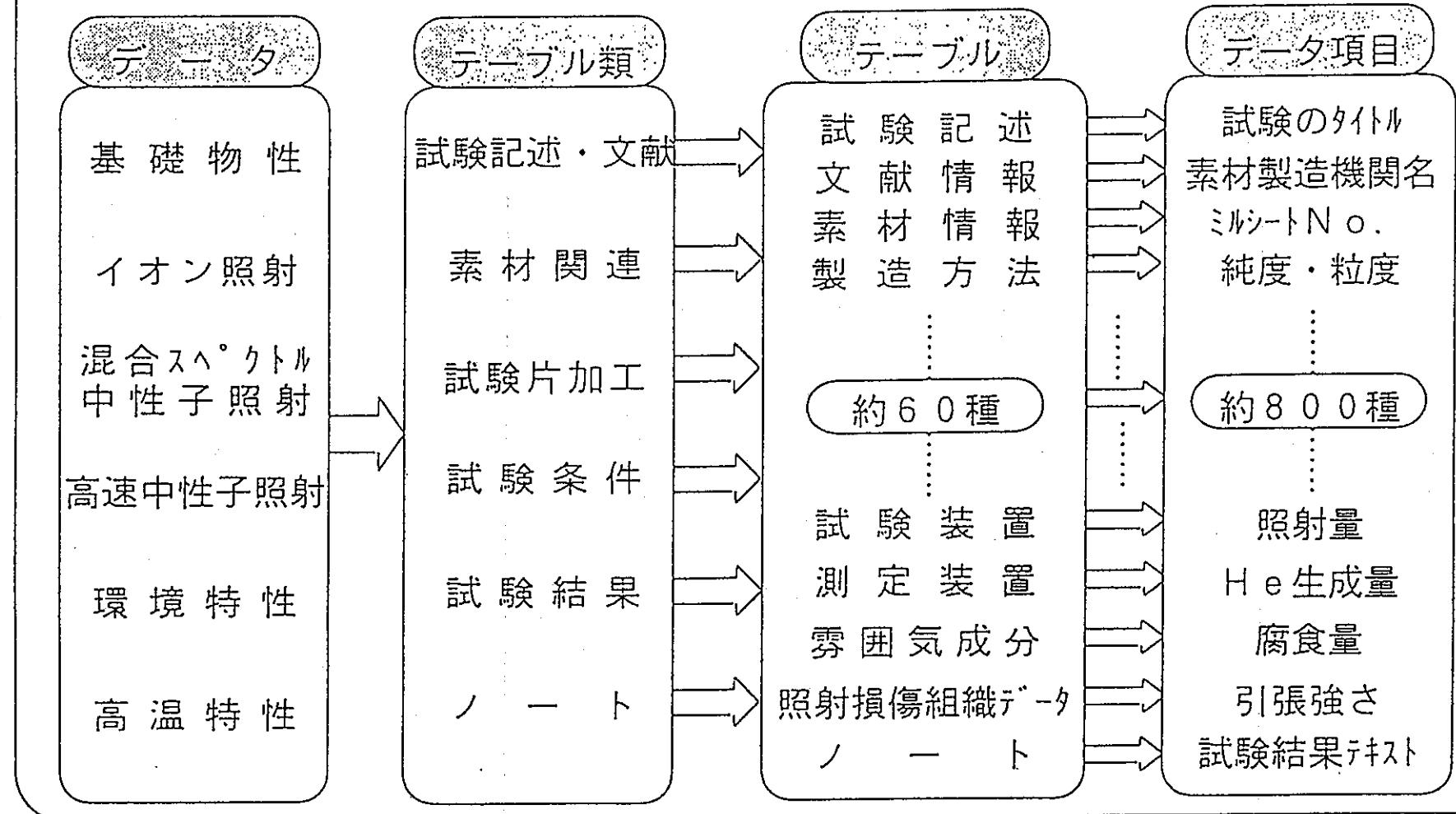
## システムの接続状況

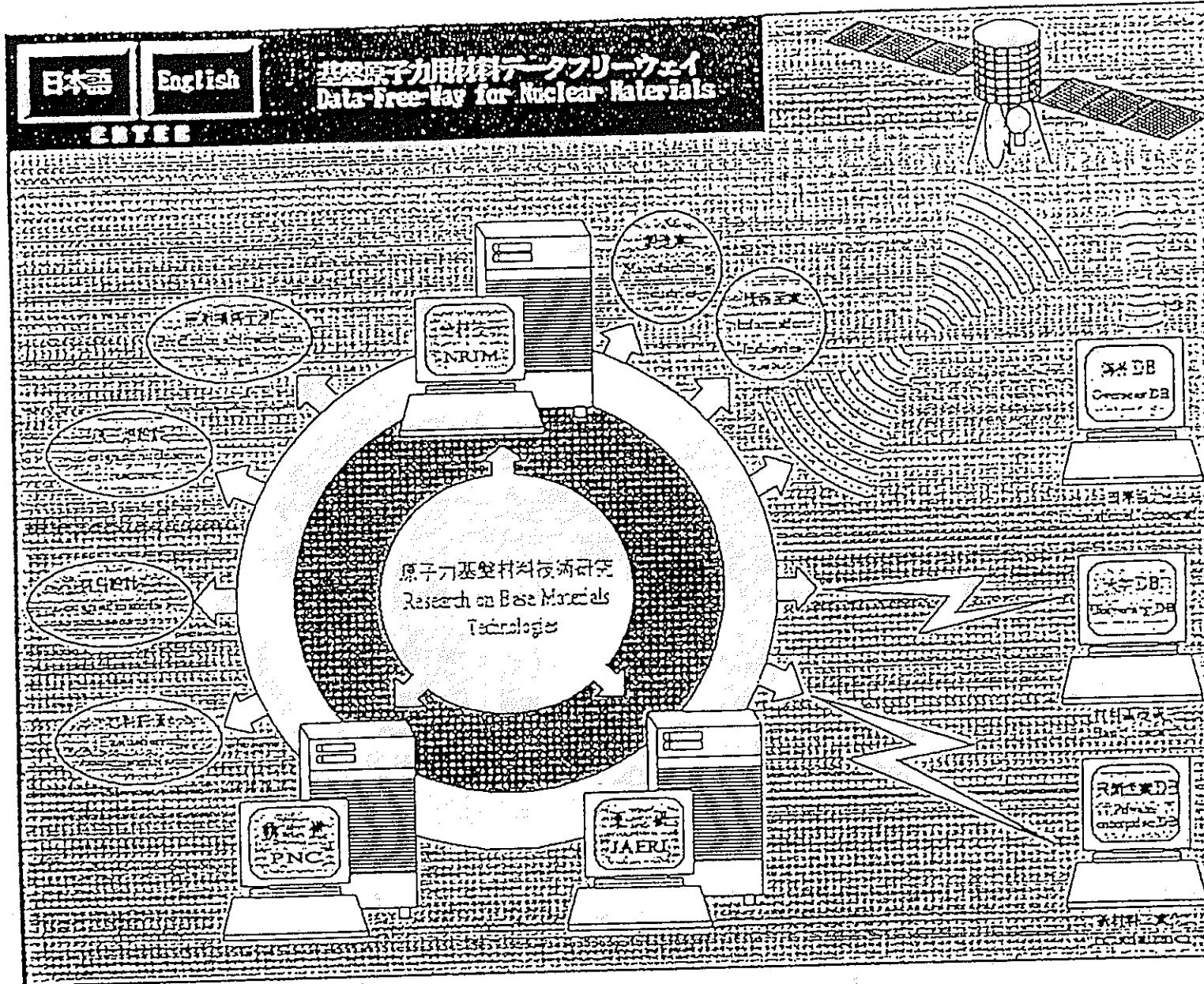


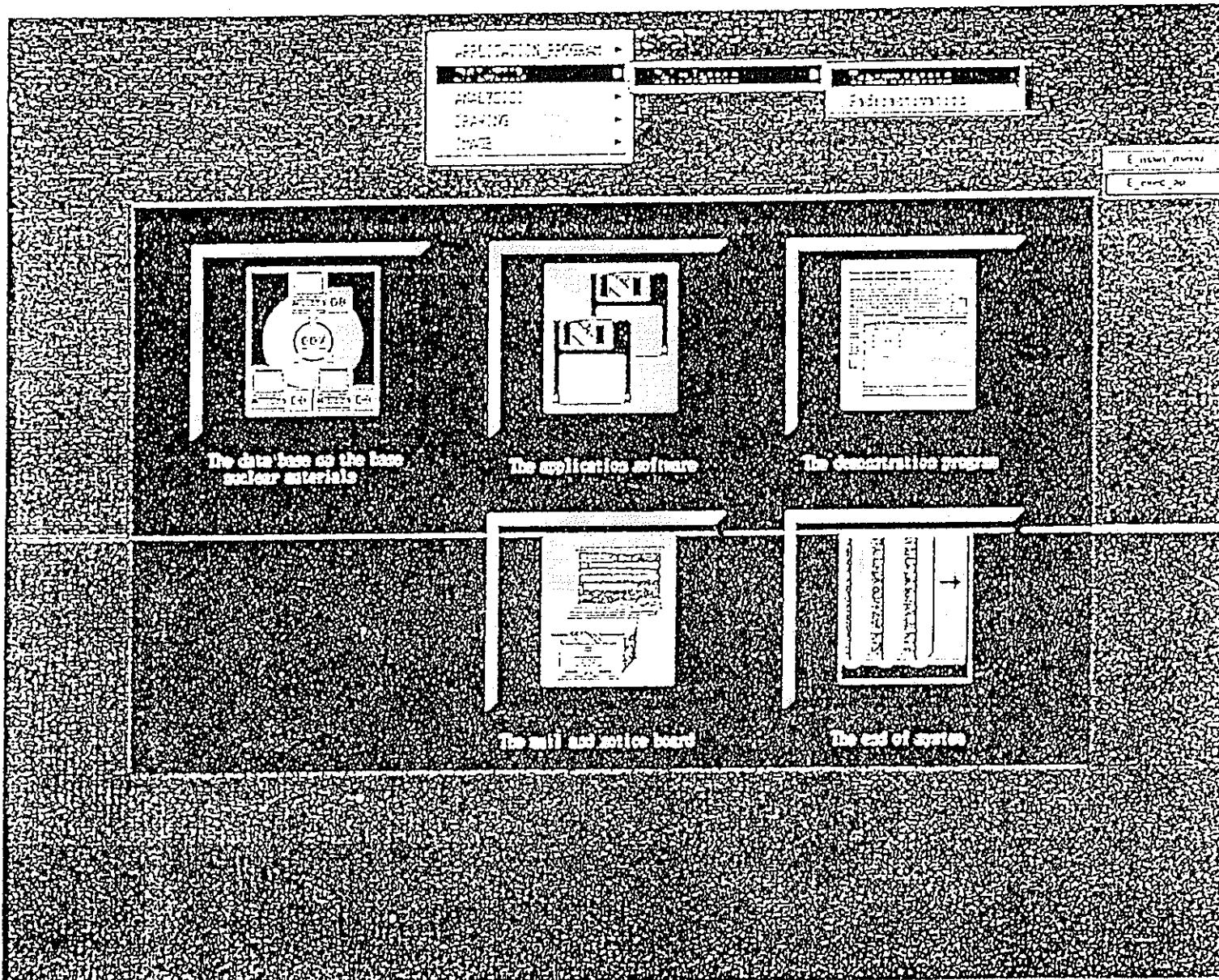
## システムの概要



## データベースの構造







Display		Condition		Conversion		
Condition	Item	DB Unit	MIN	MAX	Character	
			>=	<=	Strings	
a a	MATERIAL NAME				%Inco%	
a	FEATURE OF THE TEST	TEST PROPERTIES				
a	VALUE OF CONTROL	TEST DATASET				
a	TIME TO RUPTURE	TEST DATASET				
a	ELONGATION	TEST DATASET				
a	REDUCTION IN AREA	TEST DATASET				
a	TEMPERATURE	TEST DATASET				
a	TEST NO.	TEST NO.				
		FEATURE OF THE TEST				
		MATERIAL IS NOT				
		TIME TO RUPTURE				
		REDUCTION IN AREA				
		PRIMARY CREEP STRAIN				
		SECONDARY CREEP STRAIN				
		TERtiARY CREEP STRAIN				
		TIME TO SECONDARY CREEP				
		TIME TO TERTIARY CREEP				
		STEADY STATE CREEP RATE				
		FRACtURE LOCATION				
Message :			Count :			
Display		Condition				
G	: Grouping	O	: OR			
A	: Ascending	A	: AND			
D	: Descending					
If both of the "Display" and "Condition" cells are blank, the items are ignored.						

Display		Conversion				
Condition		MIN	MAX	Character		
	Item	>=	<=	Strings		
a a	MATERIAL NAME	:	:	: Inco		
a	FEATURE OF THE TEST	:	:	:		
a	VALUE OF CONTROL PARA.	kg/mm**2	:	:		
a	TIME TO RUPTURE	hr	:	:		
a	ELONGATION	%	:	:		
a	REDUCTION IN AREA	%	:	:		
a	TEMPERATURE	°C	:	:		

Display		Image				
Condition		Quit	Print	Save	Draw	
	Item					
a a	MATERIAL NAME	INCO				
a	FEATURE OF THE TEST					
a	VALUE OF CONTROL PARA.					
a	TIME TO RUPTURE					
a	ELONGATION					
a	REDUCTION IN AREA					
a	TEMPERATURE					

Display		Image				
Condition		Quit	Print	Save	Draw	
	Item					
a a	MATERIAL NAME	INCO				
a	FEATURE OF THE TEST					
a	VALUE OF CONTROL PARA.					
a	TIME TO RUPTURE					
a	ELONGATION					
a	REDUCTION IN AREA					
a	TEMPERATURE					

## データ入力状況

金材技研	・ 超耐熱合金のクリープ、高温引張、 高温の空気・He・H中ガス腐食	1000件
	・ ステンレス鋼・Ti合金のクリープ、引張	500件
	・ 低放射化材料、金属間化合物 金属の拡散データ、材料用核データ	整備中
	合計 1500件	
原研	・ 低合金鋼・ステンレス鋼の低サイクル疲労・ 腐食疲労・疲労き裂成長	1100件
	・ アロイ800H、ハステロイXRの強度特性	300件
	・ クロモリ鋼・アルミニウム合金の強度特性	1100件
	・ 低合金鋼・ステンレス鋼の照射特性	300件
	合計 2800件	
動燃	・ セラミックスの液体金属共存性・照射特性	1400件
	・ Li/Kによる金属材料の共存性・機械的性質	600件
	・ ステンレス鋼の照射特性	200件
	・ Nb/Mo基耐熱合金の照射特性・Li/K共存性	100件
	合計 2300件	
(試験試料1つについてのデータセットを1件とした。)		3機関の総合計 6600件

## C 3機関の協力による利点

- (1) 網羅性に優れたデータ収集が可能 (データ量の増加)
  - a. 現在あるデータの不足部分の把握
  - b. 実験計画への反映
- (2) データの解析・評価の質的、量的向上が可能 (解析ツールや知識の活用)
  - a. 発想の異なる多くの研究者によるデータの解析・評価
  - b. 豊富なデータに立脚した体系的な知見の抽出

-88-

## 実例

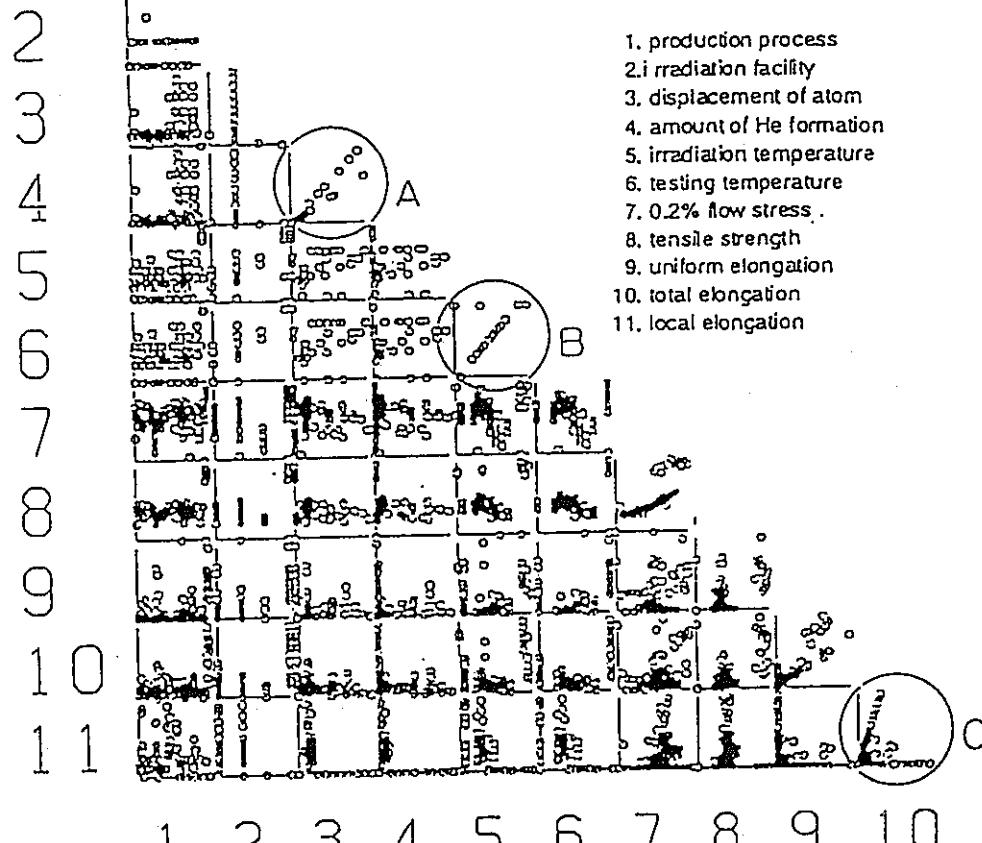
SUS316ステンレス鋼の高温引張・クリープ特性のデータを3機関で持ち寄った。

- 1 解析ツールの活用 ---- データ補間と連関図材料特性の全体像の把握
- 2 データ量の増加 ---- データ統合による広範囲の材料特性の把握
- 3 データ量の増加 ---- 既存知識の確認
- 4 データ量の増加 ---- 特性の違いを定量的に予測
- 5 データ量の増加と解析 ---- 定量的な知見の抽出

# 1 データ補間と連関図による材料特性の全体像の把握

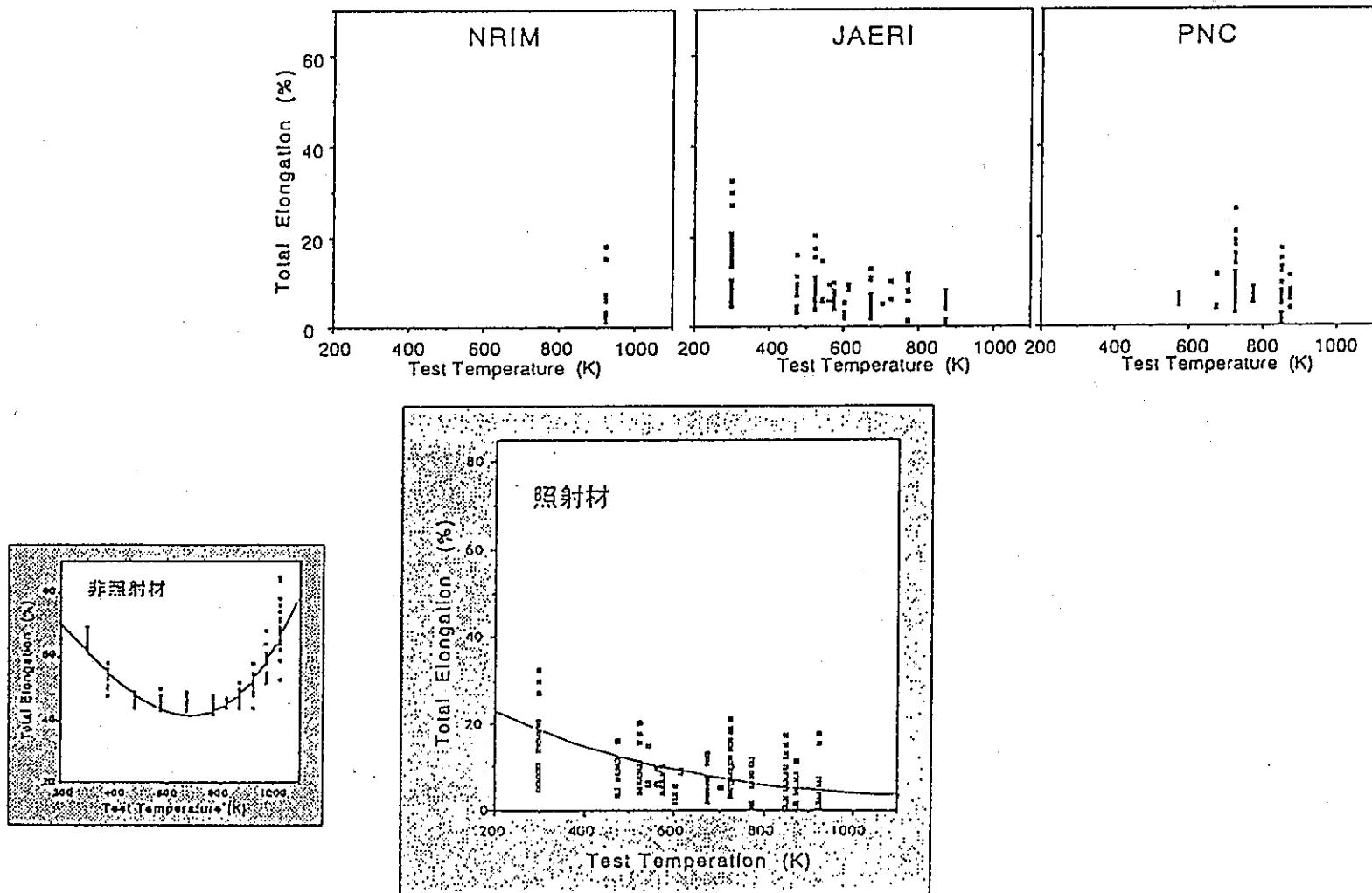
Specimen	Date	Measurement Temperature	Strength (MPa)	Elongation (%)
OL-111-A111	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A112	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A113	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A114	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A115	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A116	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A117	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A118	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A119	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A120	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A121	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A122	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A123	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A124	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A125	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A126	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A127	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A128	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A129	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A130	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A131	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A132	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A133	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A134	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A135	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A136	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A137	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A138	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A139	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A140	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A141	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A142	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A143	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A144	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A145	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A146	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A147	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A148	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A149	1992/11/11	20	150	3.1
OL-111-A150	1992/11/11	20	150	3.1
ACD11231	H20	70	150	3.1
ACD11232	H20	70	150	3.1
ACD11233	H20	70	150	3.1
ACD11234	H20	70	150	3.1
ACD11235	H20	70	150	3.1
ACD11236	H20	70	150	3.1
ACD11237	H20	70	150	3.1
ACD11238	H20	70	150	3.1
ACD11239	H20	70	150	3.1
ACD11240	H20	70	150	3.1
ACD11241	H20	70	150	3.1
ACD11242	H20	70	150	3.1
ACD11243	H20	70	150	3.1
ACD11244	H20	70	150	3.1
ACD11245	H20	70	150	3.1
ACD11246	H20	70	150	3.1
ACD11247	H20	70	150	3.1
ACD11248	H20	70	150	3.1
ACD11249	H20	70	150	3.1
ACD11250	H20	70	150	3.1
ACD11251	H20	70	150	3.1
ACD11252	H20	70	150	3.1
ACD11253	H20	70	150	3.1
ACD11254	H20	70	150	3.1
ACD11255	H20	70	150	3.1
ACD11256	H20	70	150	3.1
ACD11257	H20	70	150	3.1
ACD11258	H20	70	150	3.1
ACD11259	H20	70	150	3.1
ACD11260	H20	70	150	3.1
ACD11261	H20	70	150	3.1
ACD11262	H20	70	150	3.1
ACD11263	H20	70	150	3.1
ACD11264	H20	70	150	3.1
ACD11265	H20	70	150	3.1
ACD11266	H20	70	150	3.1
ACD11267	H20	70	150	3.1
ACD11268	H20	70	150	3.1
ACD11269	H20	70	150	3.1
ACD11270	H20	70	150	3.1
ACD11271	H20	70	150	3.1
ACD11272	H20	70	150	3.1
ACD11273	H20	70	150	3.1
ACD11274	H20	70	150	3.1
ACD11275	H20	70	150	3.1
ACD11276	H20	70	150	3.1
ACD11277	H20	70	150	3.1
ACD11278	H20	70	150	3.1
ACD11279	H20	70	150	3.1
ACD11280	H20	70	150	3.1
ACD11281	H20	70	150	3.1
ACD11282	H20	70	150	3.1
ACD11283	H20	70	150	3.1
ACD11284	H20	70	150	3.1
ACD11285	H20	70	150	3.1
ACD11286	H20	70	150	3.1
ACD11287	H20	70	150	3.1
ACD11288	H20	70	150	3.1
ACD11289	H20	70	150	3.1
ACD11290	H20	70	150	3.1
ACD11291	H20	70	150	3.1
ACD11292	H20	70	150	3.1
ACD11293	H20	70	150	3.1
ACD11294	H20	70	150	3.1
ACD11295	H20	70	150	3.1
ACD11296	H20	70	150	3.1
ACD11297	H20	70	150	3.1
ACD11298	H20	70	150	3.1
ACD11299	H20	70	150	3.1
ACD11300	H20	70	150	3.1
ACD11301	H20	70	150	3.1
ACD11302	H20	70	150	3.1
ACD11303	H20	70	150	3.1
ACD11304	H20	70	150	3.1
ACD11305	H20	70	150	3.1
ACD11306	H20	70	150	3.1
ACD11307	H20	70	150	3.1
ACD11308	H20	70	150	3.1
ACD11309	H20	70	150	3.1
ACD11310	H20	70	150	3.1
ACD11311	H20	70	150	3.1
ACD11312	H20	70	150	3.1
ACD11313	H20	70	150	3.1
ACD11314	H20	70	150	3.1
ACD11315	H20	70	150	3.1
ACD11316	H20	70	150	3.1
ACD11317	H20	70	150	3.1
ACD11318	H20	70	150	3.1
ACD11319	H20	70	150	3.1
ACD11320	H20	70	150	3.1
ACD11321	H20	70	150	3.1
ACD11322	H20	70	150	3.1
ACD11323	H20	70	150	3.1
ACD11324	H20	70	150	3.1
ACD11325	H20	70	150	3.1
ACD11326	H20	70	150	3.1
ACD11327	H20	70	150	3.1
ACD11328	H20	70	150	3.1
ACD11329	H20	70	150	3.1
ACD11330	H20	70	150	3.1
ACD11331	H20	70	150	3.1
ACD11332	H20	70	150	3.1
ACD11333	H20	70	150	3.1
ACD11334	H20	70	150	3.1
ACD11335	H20	70	150	3.1
ACD11336	H20	70	150	3.1
ACD11337	H20	70	150	3.1
ACD11338	H20	70	150	3.1
ACD11339	H20	70	150	3.1
ACD11340	H20	70	150	3.1
ACD11341	H20	70	150	3.1
ACD11342	H20	70	150	3.1
ACD11343	H20	70	150	3.1
ACD11344	H20	70	150	3.1
ACD11345	H20	70	150	3.1
ACD11346	H20	70	150	3.1
ACD11347	H20	70	150	3.1
ACD11348	H20	70	150	3.1
ACD11349	H20	70	150	3.1
ACD11350	H20	70	150	3.1
ACD11351	H20	70	150	3.1
ACD11352	H20	70	150	3.1
ACD11353	H20	70	150	3.1
ACD11354	H20	70	150	3.1
ACD11355	H20	70	150	3.1
ACD11356	H20	70	150	3.1
ACD11357	H20	70	150	3.1
ACD11358	H20	70	150	3.1
ACD11359	H20	70	150	3.1
ACD11360	H20	70	150	3.1
ACD11361	H20	70	150	3.1
ACD11362	H20	70	150	3.1
ACD11363	H20	70	150	3.1
ACD11364	H20	70	150	3.1
ACD11365	H20	70	150	3.1
ACD11366	H20	70	150	3.1
ACD11367	H20	70	150	3.1
ACD11368	H20	70	150	3.1
ACD11369	H20	70	150	3.1
ACD11370	H20	70	150	3.1
ACD11371	H20	70	150	3.1
ACD11372	H20	70	150	3.1
ACD11373	H20	70	150	3.1
ACD11374	H20	70	150	3.1
ACD11375	H20	70	150	3.1
ACD11376	H20	70	150	3.1
ACD11377	H20	70	150	3.1
ACD11378	H20	70	150	3.1
ACD11379	H20	70	150	3.1
ACD11380	H20	70	150	3.1
ACD11381	H20	70	150	3.1
ACD11382	H20	70	150	3.1
ACD11383	H20	70	150	3.1
ACD11384	H20	70	150	3.1
ACD11385	H20	70	150	3.1
ACD11386	H20	70	150	3.1
ACD11387	H20	70	150	3.1
ACD11388	H20	70	150	3.1
ACD11389	H20	70	150	3.1
ACD11390	H20	70	150	3.1
ACD11391	H20	70	150	3.1
ACD11392	H20	70	150	3.1
ACD11393	H20	70	150	3.1
ACD11394	H20	70	150	3.1
ACD11395	H20	70	150	3.1
ACD11396	H20	70	150	3.1
ACD11397	H20	70	150	3.1
ACD11398	H20	70	150	3.1
ACD11399	H20	70	150	3.1
ACD11400	H20	70	150	3.1

データ補間：  
3機関から収集したデータの  
He生成量予測ツールによる。

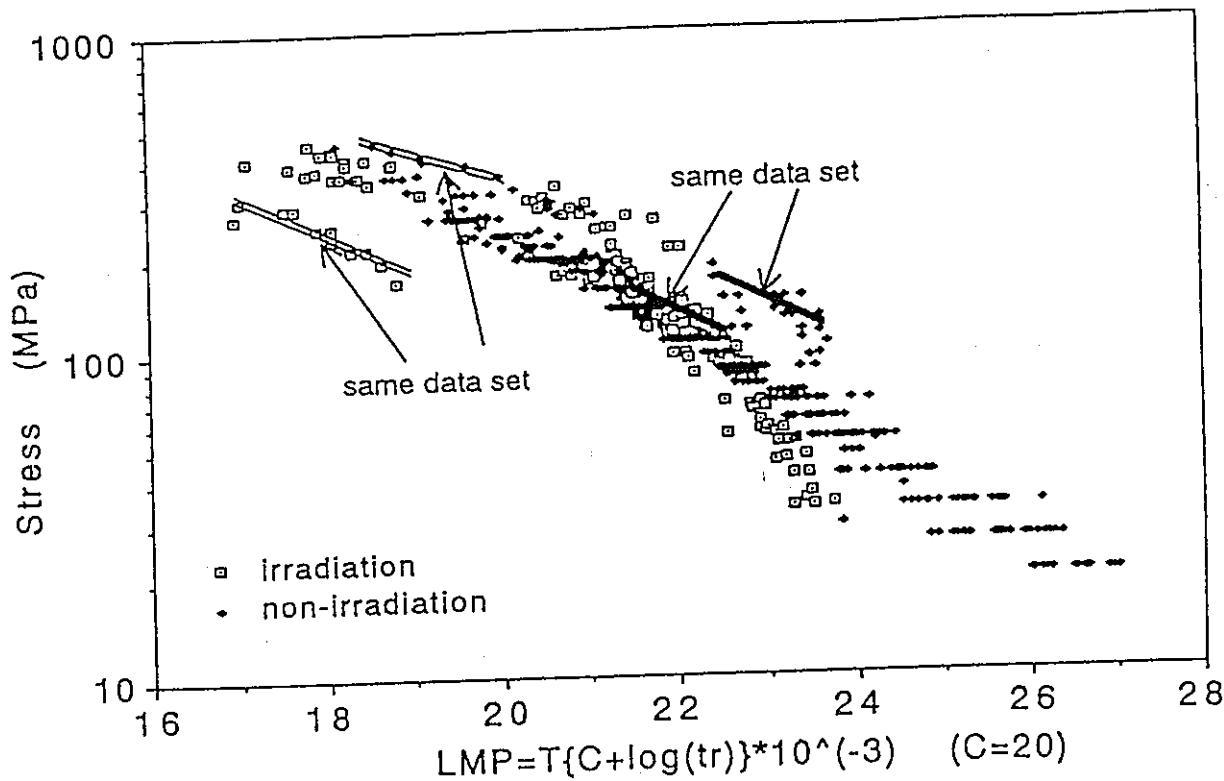


1. production process
2. i irradiation facility
3. displacement of atom
4. amount of He formation
5. irradiation temperature
6. testing temperature
7. 0.2% flow stress
8. tensile strength
9. uniform elongation
10. total elongation
11. local elongation

## 2 データの統合による広範囲の材料特性の把握

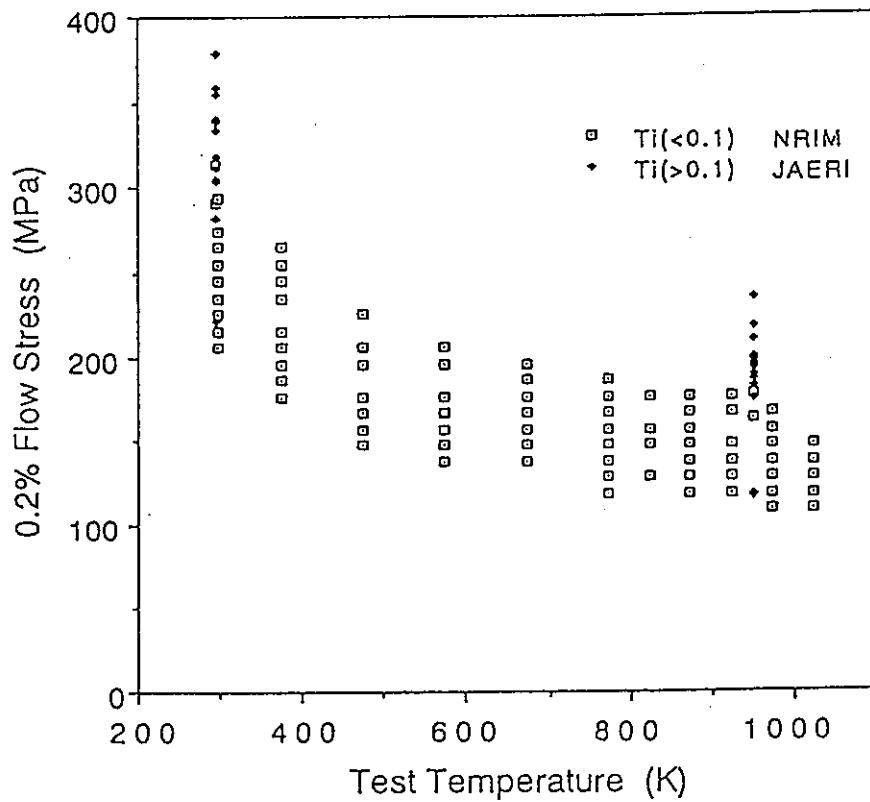


### 3 既存知識の確認



Relation between stress and Larson-Miller parameter on non-irradiated and irradiated creep test in type 316 steels.  
Where, C=20, T=temperature (K), tr=rapture time(hr).

#### 4 特性の違いを定量的に予測



The Classification of the data on 0.2% flow stress in NRIM and JAERI rearranged by Titanium contents.

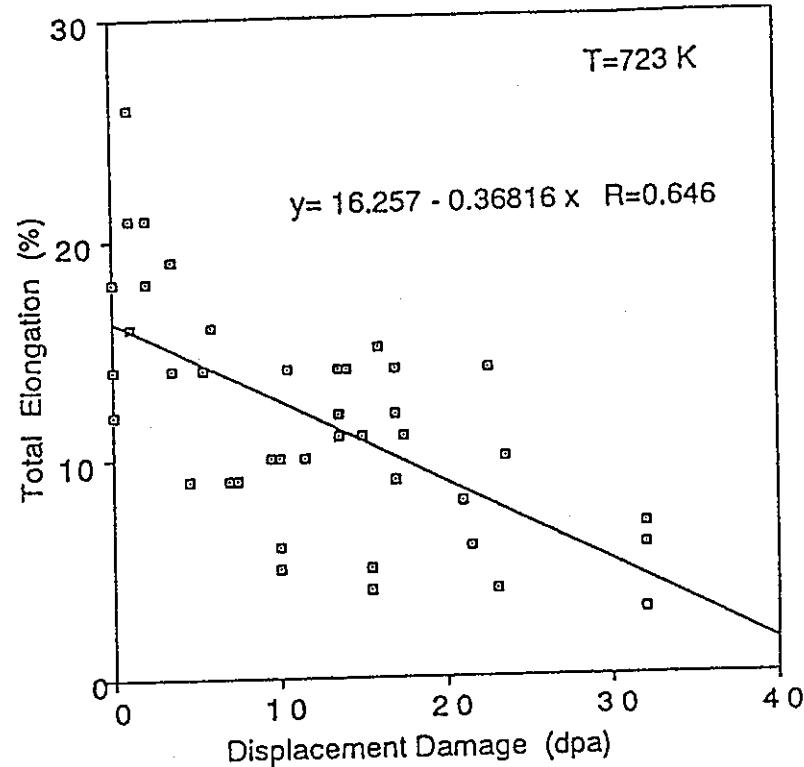
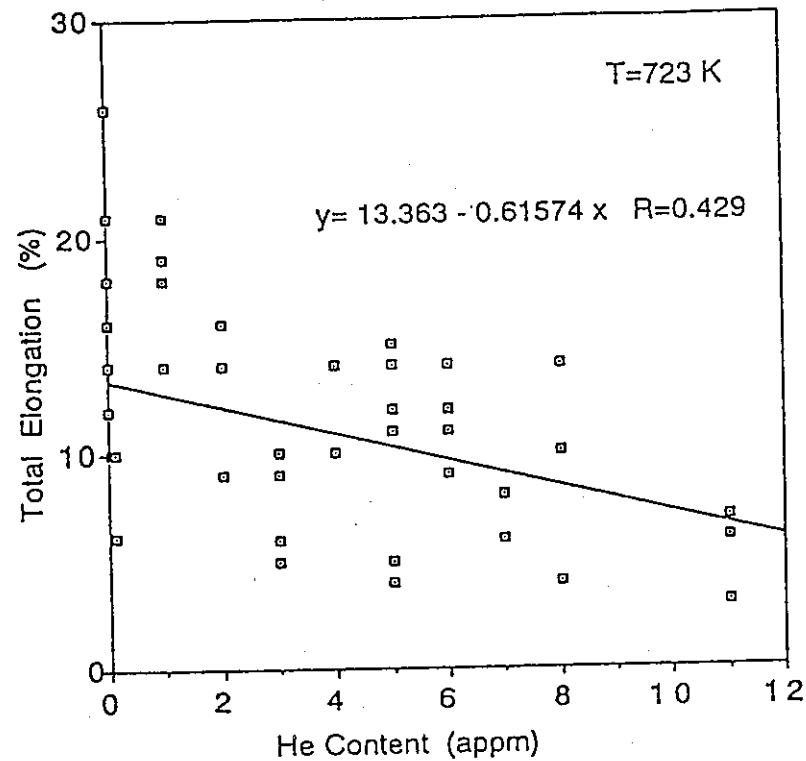
$$F_i(T, C_i) = C_0 + f(T) + f(C_i) + E_0$$

0.2% flow stress ( $F_y$ )

$$\begin{aligned} F_y(T, C_i) = & 485.2 - 1.119T - 0.00148T^2 \\ & + 0.000000647T^3 \\ & + 193.4 - 144Si + 83.2Mn-Mo \\ & + 199.4Ti + 2630B - 779N \end{aligned}$$

## 5 定量的な知見の抽出

- 6 -



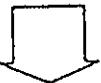
Relation between total elongation and He content (A)  
or displacement damage of atom (B).

## D 各機関の独自の研究例

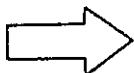
- 1 金材技研 中性子照射によるHe生成量の予測
- 2 原研 データ入力ガイドシステムの試作
- 3 動燃 セラミックスのNa腐食解析

# 動燃におけるセラミックスのNa腐食解析

従来の金属材料では限界がある



セラミックスの長所を活用



高速炉の高性能化

- 高い高温強度
- 優れた耐熱性
- 優れた低摩擦・耐磨耗性
- 低い熱膨張係数
- 低密度 等

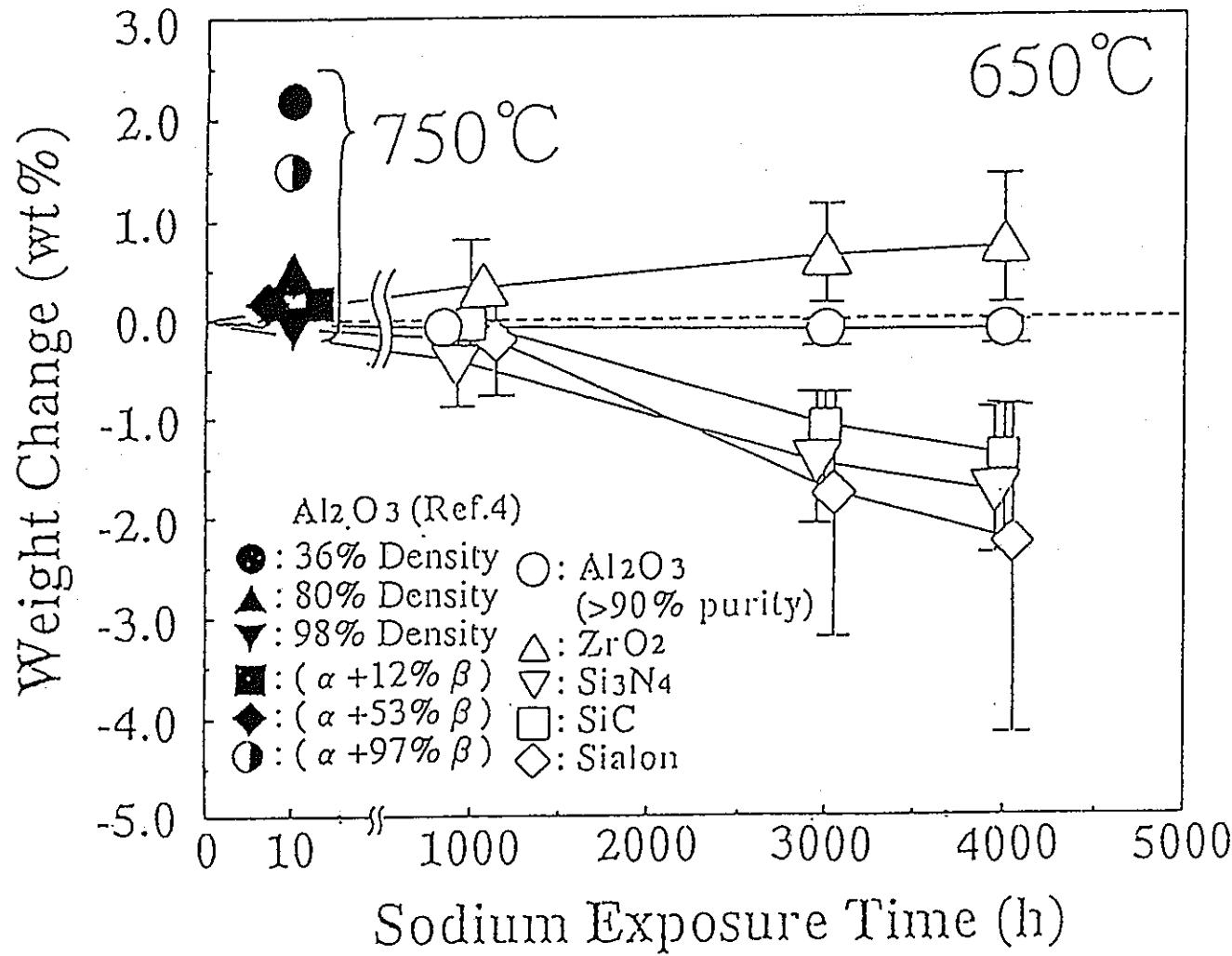
## 適用例

- 热遮蔽板（熱応力緩和）
  - 高温化
- 機器の接触摺動部材 等
  - 高信頼性化

## ■長期的目的

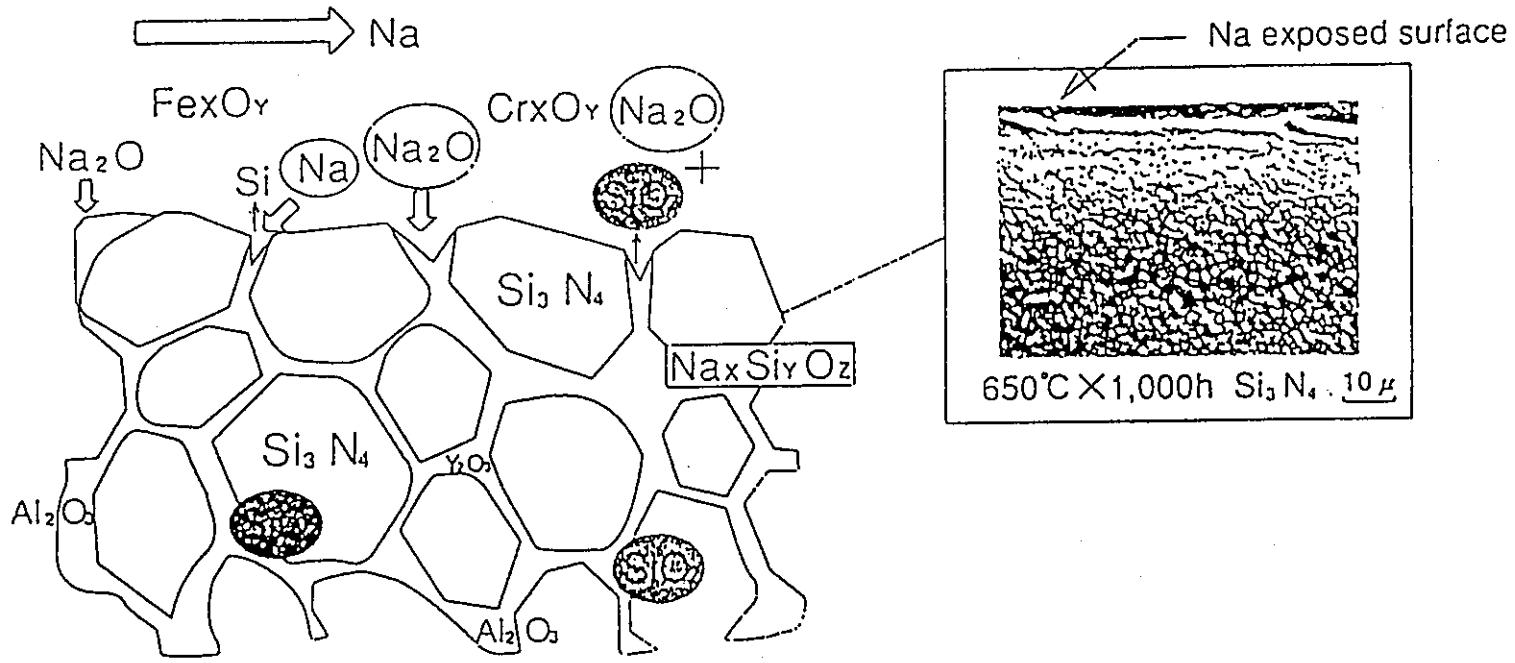
- ナトリウム腐食機構を解明し、耐腐食性に優れたFBR専用改良型エンジニアリングセラミックスの創製のための試験評価を行なう。
- 中性子照射試験に着手し、照射損傷挙動・機構を評価する。
- 高温材料強度試験技術（引張・曲げ・破壊靭性）を確立し、エンジニアリングセラミックスの破壊機構およびナトリウム環境効果を評価する。

## セラミックスのNa共存性調査結果



## セラミックスのNa腐食モードの概念図

Example on  $\text{Si}_3\text{N}_4$



Si ceramics

$\text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{Si} + \text{Additives} (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Y}_2\text{O}_3) \rightarrow \text{SiO}_2$

Low Purity  $\rightarrow$  Impurity  $\text{SiO}_2$ , etc.

Reaction with  
 $\text{Na}_2\text{O}$

## E おわりに

- 1 システム構築の課題と達成度
- 2 得られた成果の発表
- 3 今後の研究計画
- 4 システム充実の将来構想（次期計画）
- 5 利用技術の開発協力
- 6 まとめ

# システム構築の課題と達成度

課題	達成度
1. システムの整備 a. 研究成果のデータベース化 b. 材料情報の相互利用	○システム整備をほぼ完了した ・分散型データベースを構築した ・3機関間のネットワーク網の整備を完了した (計量研、船舶研、JICSTが追加接続予定)
2. データの収集 a. 汎用性、専門性の高いデータ b. 先端的材料データ	○660件の収録を完了した ・収録を継続中 ・収録を継続中
3. ユーザ・インターフェースの開発 a. 容易な検索 b. 知的検索	○メニュー選択による操作画面を設計・製作した ・SQL自動生成画面での検索を可能にした ・将来の課題(辞書の収集を進める)
4. 利用技術の開発 a. 言語環境 b. 新たな価値の生成と新知見の獲得	○現在検討中 ・日本語と英語の使用を可能にした ・一部整備したが、本格的には将来の課題
5. 多機関の協力 a. システム構築の体制 b. 利用の拡大	○委員会等を設置し協力体制を確立した ・データフリーウェイ構築共同研究協議会を設置 ・データフリーウェイ技術検討会を設置

## 得られた成果の発表

成果報告書	3件
論文発表（国際会議を含む）	6件
学会発表	5件
新聞掲載	4件
市販ソフトウェアへの寄与	1件

## 今後の研究計画

### 利用環境整備

平成5年度 知的検索ガイドの検討と設計（辞書の収集）  
データ入力  
ネットワークの拡張（計量研、船舶研、JICSTとの接続）

平成6年度 画像データ処理機能を含む検索ガイドの作製  
データ入力  
次期計画の策定

事前研究費平価資料

( 原子力基盤クロスオーバー研究第 II 期計画 )

平成 6 年度～ 10 年度

研究題目：複合環境用セラミックス系マルチコンポジット  
マテリアルと表面改質技術の開発

-101-

平成 6 年 1 月 24 日

重燃事業団・大洗工学センター  
先進技術開発室  
力口納茂機

研究題目	複合環境用セラミックス系マルチコンポジット マテリアルと表面改質技術の開発
------	--

< 研究目的 >

新型プラントの高性能化（高温化、高耐食性化、耐放射線化、長寿命化、高機能化、高信頼化等）を最終目的とし、複合環境（高温Na、高速中性子、中性子・ $\gamma$ 線複合環境、放射線腐食環境、核燃料、高熱応力場等の複合環境）に適用可能な構造材料用マルチコンポジットマテリアルの創製のため、材料設計・試作・評価を行うとともに複合化技術と接合技術を開発する。

また、各種材料の高性能化のため、表面改質技術を開発する。

併せて、創製した新素材および表面改質材の高速炉複合環境への適用性を評価する。

< 研究テーマ >

- (A) 新型セラミックスコンポジットの創製
- (B) 新型化傾斜組成コンポジットの創製
- (C) 遮蔽用透明コンポジットの創製
- (D) 表面改質技術の開発

## 研究テーマ及びマスタースケジュール

研究テーマ	元年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度	7年度	8年度	9年度	10年度	11年度	
高性能制御材		プロセス開発、特性評価			テーマ移管 終了							
高速炉用セラミックス			Na耐食性改善方策検討				耐食性・強度・照射特性 適用性評価、接合技術					
傾斜機能材			材料設計手法、プロセス検討				プロセス開発、特性評価 適用性評価、接合技術					クロスオーバー研究
高性能遮蔽材			プロセス開発、特性評価		終了		透明遮蔽材プロセス開発、特性評価					動燃 原研 金材研 無機材研 物質研 大学 メー力
表面改質技術					新規		改質技術開発、耐食性・強度評価					
耐熱合金		材料設計、試作、評価			新規		Li耐食性・強度評価、適用性評価					動燃／豊橋技科大 共同研究
データフリーウェイ			システム開発、データ入力			利用技術開発、利用拡大、データ拡充						動燃／金材研／ 原研 共同研究

12. 研究開発スケジュール(第十四回)

複合環境用マルチコンポジットマテリアルの開発 「複合環境用セラミックス系マルチコンポジットマテリアルと表面改質技術の開発」

項目	年度 第1期計画 元年度～5年度	当該評価対象期間					複合環境での適用性評価
		6年度	7年度	8年度	9年度	10年度	
セラミックス系マルチコンポジットの創製	従来材の耐食性評価、耐食性改良方策の探索、强度試験法確立	改良方策の抽出 新型材の試作、耐食性評価 短時間強度評価	改良方策の校り込み 新型材の試作、中間試験 中性子照射試験	耐食性評価 クリープ強度評価	改良方策確立 中性子照射損傷解析評価 接合法開発予備試験 接合法探索・選定・熱応力解析 腐食・破壊・損傷機構検討 中間評価		
		FINASによる熱応力・変形解析、最適材料設計手法の確立、製造プロセス予備検討	複合化プロセス改良方策の探索 傾斜複合化プロセス検討 耐食性・短時間強度評価 中性子照射試験	改良方策の校り込み 傾斜複合化プロセス改良 クリープ特性評価 中性子照射損傷解析評価 接合法開発予備試験 接合法探索・選定・熱応力解析 腐食・破壊・損傷機構検討 中間評価	複合化プロセス確立 クリープ特性評価 中性子照射損傷解析評価 接合法開発予備試験 接合法探索・選定・熱応力解析 腐食・破壊・損傷機構検討	複合環境での適用性評価	
遮蔽用透明コンポジットの創製	新規	複合化プロセス開発予備検討 透明遮蔽材の材料設計・試作	複合化プロセス開発改良方策の探索 試作材の基本特性評価	複合化プロセス確立改良方策の校り込み 試作材の基本特性評価 中性子／γ線遮蔽実験	遮蔽性能評価・複合環境での適用性評価 中性子照射試験 中間評価		
		ビーム種類・注入条件の予備検討 耐食性改善の予備検討	耐食性改善の見通し 引張・破壊じん性予備検討	ビーム注入条件の改善 耐食性評価 引張・破壊じん性向上の見通し クリープ特性予備検討	ビーム注入条件の最適化 最適ビーム条件における耐食性評価 最適ビーム条件における引張・破壊じん性評価 最適ビーム条件におけるクリープ特性評価 中性子照射試験準備	表面改質技術基盤の確立 最適ビーム条件における耐食性評価 最適ビーム条件における引張・破壊じん性評価 最適ビーム条件におけるクリープ特性評価 中性子照射試験	

## (A) 新型セラミックスコンポジットの創製

### < 研究目的 >

第Ⅰ期計画におけるセラミックスのナトリウムに対する腐食挙動・機構の解明に関する成果を踏まえ、Naに対し、粒界腐食を生ぜず、高温強度、破壊靭性、耐放射線性に優れた高速炉用新型セラミックスコンポジットの創製のため、腐食・破損・照射損傷の評価と機構の解明、これらに基づく改良方策の探索・確立、新素材の材料設計および高速炉複合環境での適用性評価を行う。

さらに、金属等との接合技術の開発を行う。

## セラミックス適用箇所（候補）

- 機器接触・摺動部材（燃料交換機、CRDM、IHX、ポンプ、配管支持部 等）
- 熱応力緩和材（サーマルライナ 等）
- サポート部材（配管コールドクランプ材、機器支持部遮熱材 等）
- 断熱部材
- 原子炉容器とガードベッセルとの間の詰物
- 各種炉内構造部材
- 燃料サイクル施設への反映  
(セラミックス製MOX焼結皿、転換施設脱硝皿、TRU燃料用マトリックス 等)

# Tested ceramics

	Sintered		CVD	Single Crystal
	Existing	Advanced		
Engineering Ceramics	$\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{ZrO}_2$ $\text{Si}_3\text{N}_4$ $\text{SiC}$ Sialon $\text{AlN}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$  $\text{Si}_3\text{N}_4$ $\text{SiC}$ Sialon	SiC	$\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{ZrO}_2$  $\text{SiC}$
Additives	$\text{MgO}$ $\text{Y}_2\text{O}_3$ $\text{CaO}$			$\text{MgO}$
Others	$\text{MgAl}_2\text{O}_4$ $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ $\text{TiC}$ $\text{BN}$ $\text{AlON}$		TiC BN	$\text{MgAl}_2\text{O}_4$ $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ $\text{TiC}$

## A. 新型セラミックスの創製

### 市販セラミックスのNaによる腐食特性（重量変化）（A-2, 3）

- (1)表1に示すような種々の市販の焼結法によるセラミックス、CVD法により作成されたセラミックスならびに単結晶を対象に、550°Cおよび650°C、1000時間（最長4000時間）のNa中腐食試験を実施し、Naに対する耐食性を評価した。
- (2)各セラミックスについて、腐食量の測定を行った結果を図1および図2に示す。単結晶やCVD材に比べ、焼結セラミックスの腐食量が非常に大きいこと、腐食量の温度および時間依存性は酸化物系セラミックスよりも非酸化物系Siセラミックスの方が顕著であることを明らかにした。また、ほとんどの材質のものが腐食試験により重量損失を示したのに對して、ZrO<sub>2</sub>は重量増加になった。
- (3)スピネル ( $MgAl_2O_4$ ) やYAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ )、さらに助剤として用いられる MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN は良好な耐食性を示したのに対して、TiCやBNは耐食性に劣った。特に TiC, BNは単結晶やCVD材の腐食量も大きく材質そのものがNaに対する耐食性に劣ることが明らかになった。

(1)酸化物系セラミックス  $\text{Al}_2\text{O}_3$ の場合：TEM/EDS 観察等の結果、以下のことが明らかになった。

①Na浸漬材において、Naは粒界だけから検出され、結晶粒内からは検出されなかった。

②粒界からはSi, Mg, Ca, Alが検出されたが、これらのうち、Mgは緻密化促進剤として  $\text{MgO}$  の形で添加されたものであり、Si, Caは不純物である。これらは全て酸化物の形態で存在していると考えられ、その構造はガラス相である。

以上のことから、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ のNaによる腐食は粒界腐食が支配的であり、その原因是粒界におけるSi-O化合物を主成分としたガラス相の存在である。Na腐食による重量損失はこのSi-O化合物と環境中のNaとの反応（ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ の生成反応）によって粒界相成分がNa中に溶出するために起こることが推察される。

(2) 非酸化物系SiセラミックスSiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Sialonの場合：図1に示すTEM/EDS観察等の結果、以下のことが明らかになった。

- ① Na浸漬材において、Naは粒界だけから検出され、結晶粒内からは検出されなかった。
- ② 粒界からはSi, Y, Alが検出され、これらのうち、Y, Alは焼結助剤として酸化物の形で添加されたものである。これらは複合酸化物の形態で存在していると考えられ、その構造はガラス相である。
- ③ 部分的に結晶化している粒界からはNaは検出されなかった。

以上のことから、Si系セラミックスのNaによる腐食も Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>同様粒界腐食が支配的であり、その原因是原料粉末の酸化や焼結助剤と母相成分によって焼結過程において生成された、粒界相中のSi-O化合物がNaと反応する（Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>の生成反応）ためであると考えられる。大きな重量損失はこの反応に伴って粒界相成分のNa中への溶出や粒界の脆弱化による結晶粒の脱落のために起こると推察される。

したがって、耐食性改善のためには粒界の組織・構造を制御し、粒界腐食を抑制することが重要である。

粒界の組織・構造の制御の具体的方策

- |               |                                   |                 |
|---------------|-----------------------------------|-----------------|
| ・粒界相の結晶化      | ・粒界相体積の低減化                        | ・Naに対して安定な助剤の選択 |
| ・Si-O化合物の生成抑制 | ・原料粉末の高純度化（特に $\text{SiO}_2$ の排除） |                 |

$\text{Al}_2\text{O}_3$  ■ ■ ■ 4N  $\text{Al}_2\text{O}_3$  焼結体（焼結体の高純度）

$\text{SiC}$  ■ ■ ■  $\text{Al}_2\text{O}_3$  助剤  $\text{SiC}$  (Naに対して安定な焼結助剤の選択)

$\text{Si}_3\text{N}_4$  ■ ■ ■ 粒界結晶化  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (粒界相の結晶化)

Sialon ■ ■ ■ 粒界相体積低減 Sialon (粒界相体積の低減化)

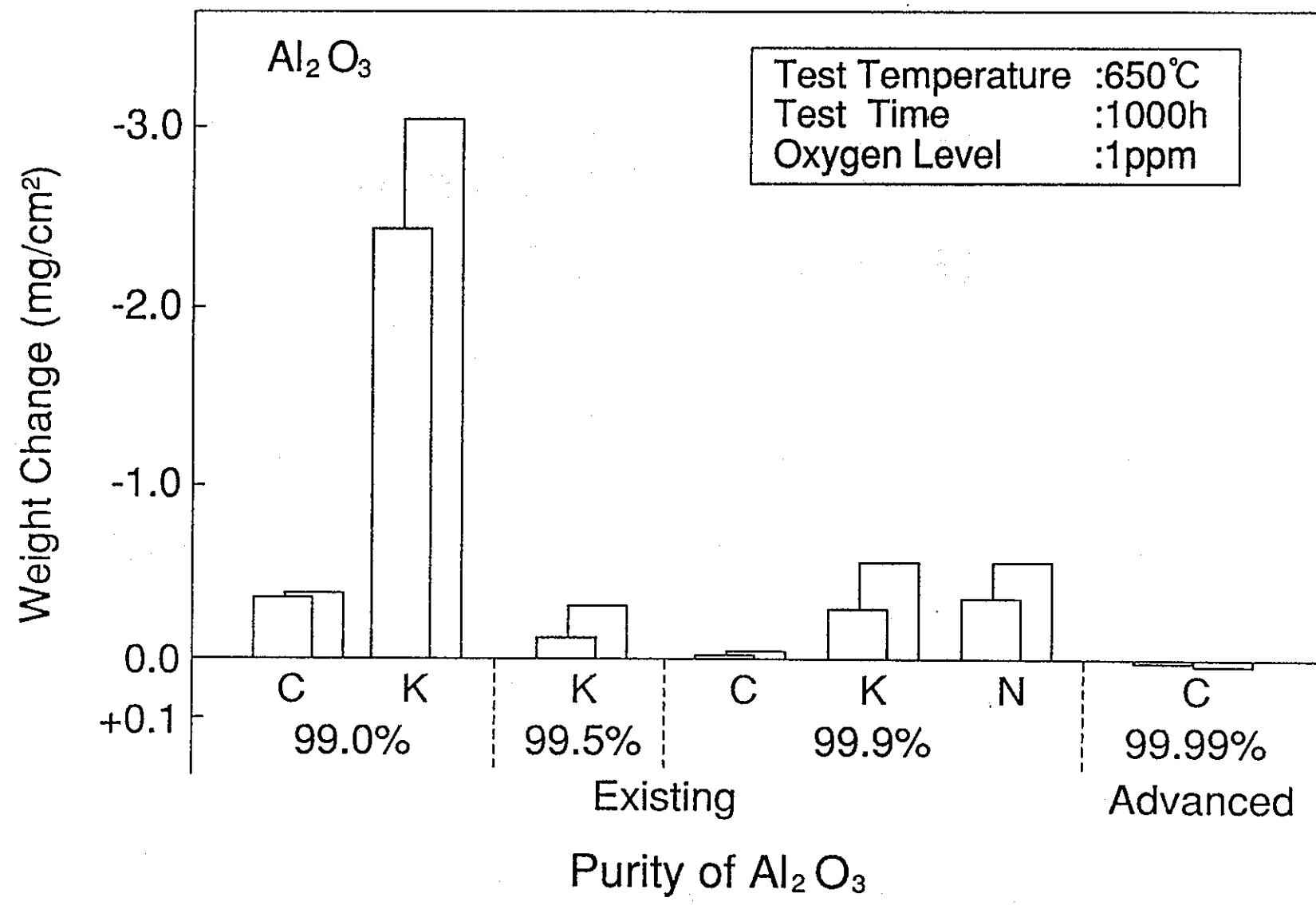


Fig.5 Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  purity on weight change

Si系セラミックスの耐食性改善のため、新たに下記に示す様な第2次新型セラミックスおよび表面改質セラミックスの試作を現在進めている。

①第2次新型セラミックス

SiC : B<sub>4</sub>C 助剤SiC

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 助剤・脱SiO<sub>2</sub> SiC

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> : 粒界相結晶化・SiO<sub>2</sub>低減Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
ナノコンポジット材

Sialon: Sialon-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>複合材 (ジルゲル合成)  
粒界相低減・低Z値Sialon

②表面改質セラミックス

Mo/Feイオン注入SiC

Mo/Feイオン注入Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Mo/FeイオンビームミキシングSiC

Mo/FeイオンビームミキシングSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

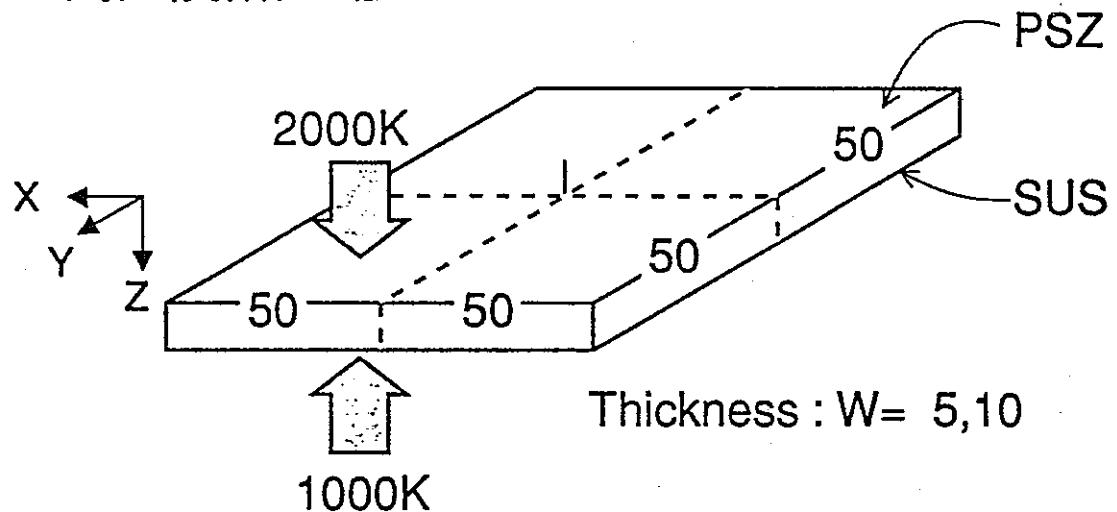
## (B) 新型傾斜組成コンポジットの創製

### < 研究目的 >

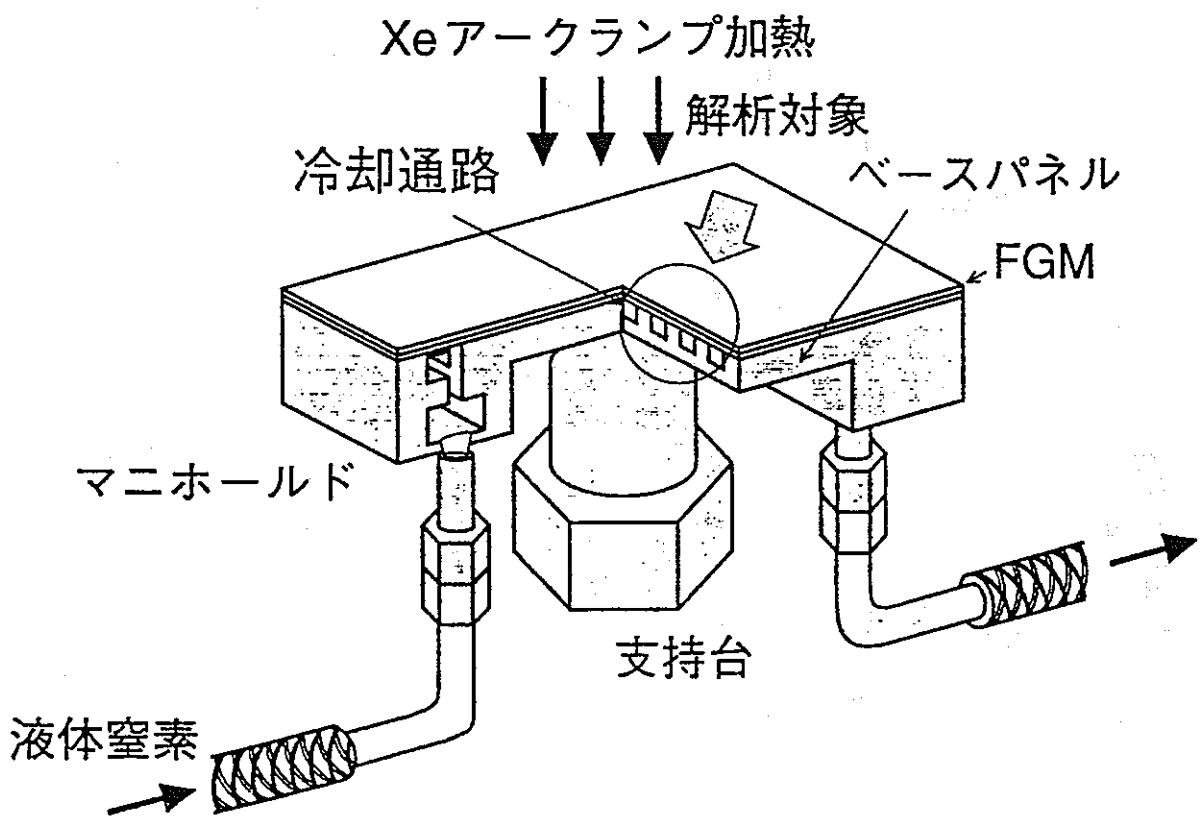
第Ⅰ期計画における傾斜機能材のFINASによる材料設計手法と製造プロセスの予備検討に関する成果を踏まえ、熱応力を飛躍的に緩和する高速炉用傾斜組成コンポジットの創製のため、熱的・機械的材料特性最適化のための材料設計を行うとともに、傾斜化・ナコンポジット化・マイクロキャセル化等の微細組織構造制御による複合化プロセスの開発、腐食・破損・照射損傷の評価と機構の解明、これらに基づく改良方策の探索・確立と高速炉複合環境での適用性評価を行う。

さらに、金属等との接合技術の開発を行う。

三次元平板簡易モデルによる非定常／弾性解析  
高温度落差場



三次元構造体モデルによる非定常／弾・塑性解析  
高熱流束環境

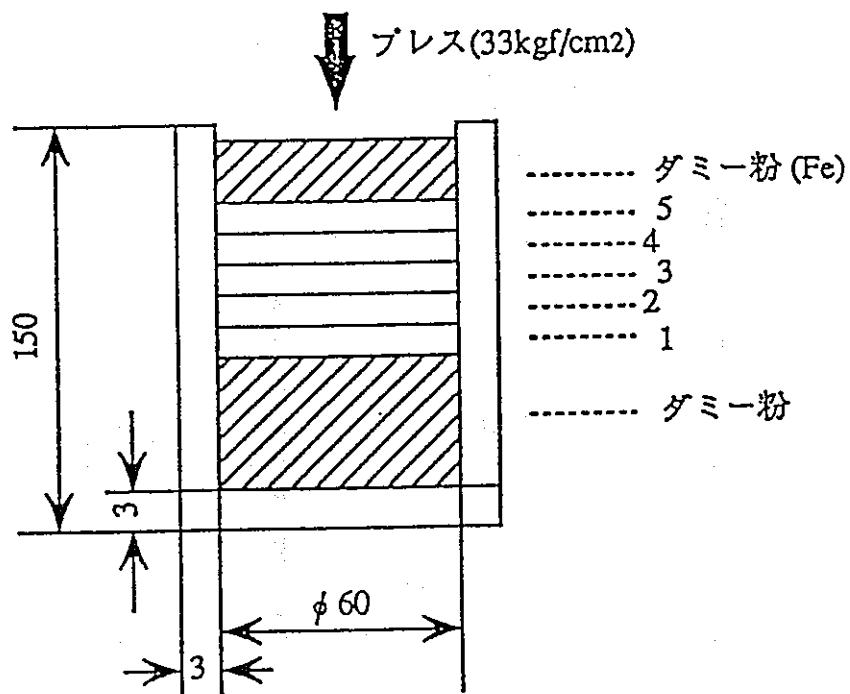


## B. 化貢余斗機育巨才の倉リ集 — 热応力・热伝導の解析手法の確立 (B-1)

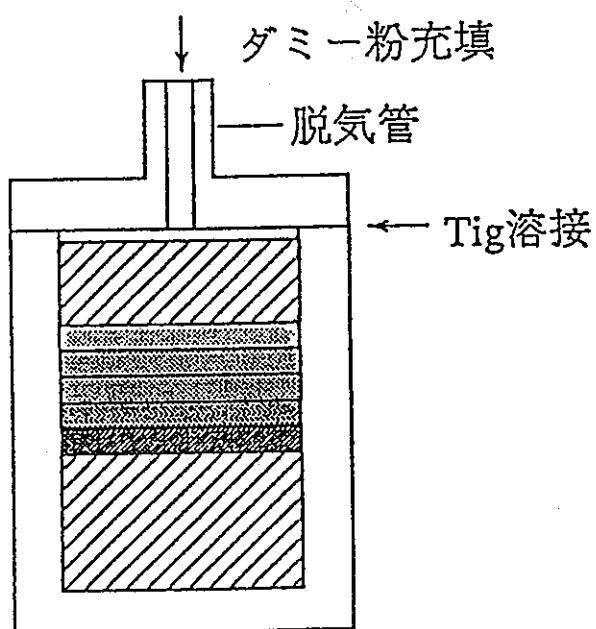
- (1)動燃開発の汎用有限要素解析コード「FINAS」を、物性値の関数として組み込めるように改造し、FGMの熱応力・熱伝導解析を可能とした。
- (2)無傾斜機能材料 (NFGM) の物性データを基に、PSZ/SUS系FGMの各種物性値を組成及び温度の関数として定式化した。図1に計算に使用したFGM板厚方向での位置と組成との関係を示す。図2に示す簡易平板状FGMの $\Delta T = 1000\text{ K}$ の高温度落差場における非定常弾性解析を実施した。その結果、高温度落差場においては、熱遮蔽性重視型FGMが熱応力緩和の点で有利であることが明らかになった。
- (3)解析手法確立のため、航技研(NAL)での高熱流束環境での実験を想定して熱伝導・熱応力解析を行った。解析に用いたモデルを図3に示す。このモデル（基本要素モデル）は実試験材の一部分をモデル化したものである。その結果、高熱流束環境下においては熱伝達性能重視型FGMが熱応力緩和の点で有利であることが明らかになった。
- (4)さらに、実際の試験体に近づけるため、図4に示す実寸形状モデルで熱伝導・熱応力解析を行った。高熱流束環境下におけるFGMの熱応力解析は、実試験の温度測定結果（表面温度分布）に比例するように入熱分布を決めることにより、正確な熱応力解析が可能であることを明らかにした。

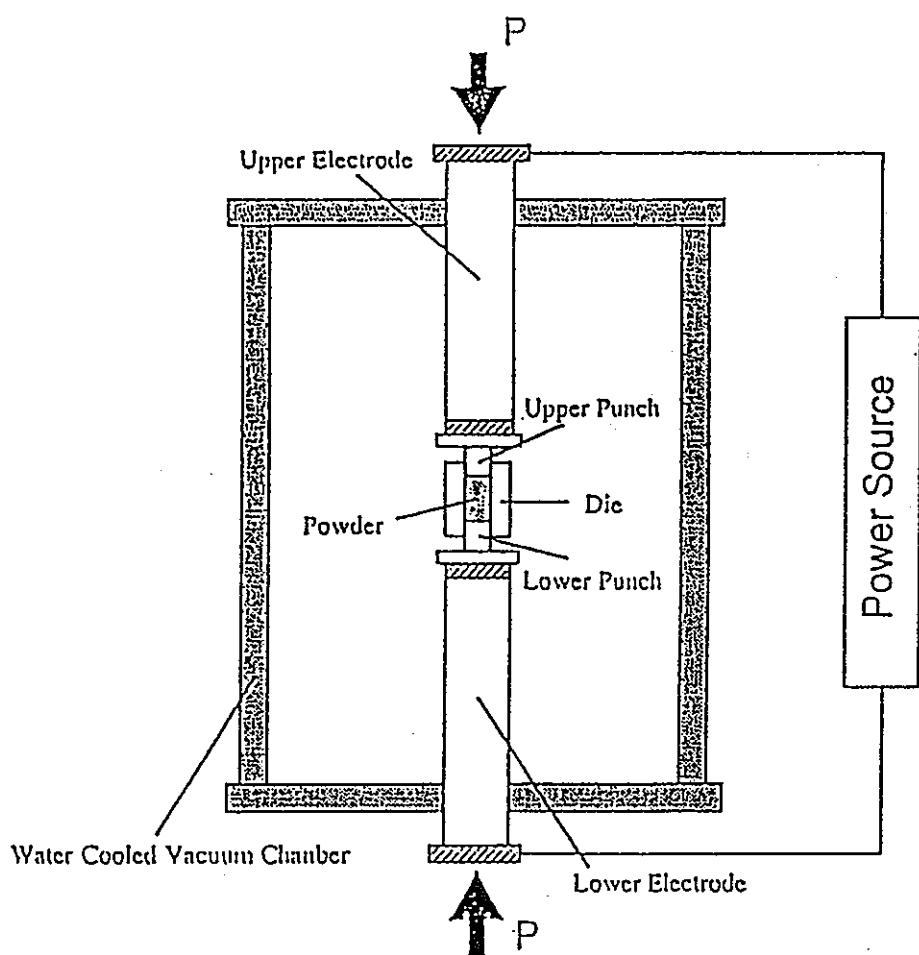
## FGM製造プロセス (MA/HIP法)

(1) カプセルへの粉末積層充填 (カプセル材質:SUS304)



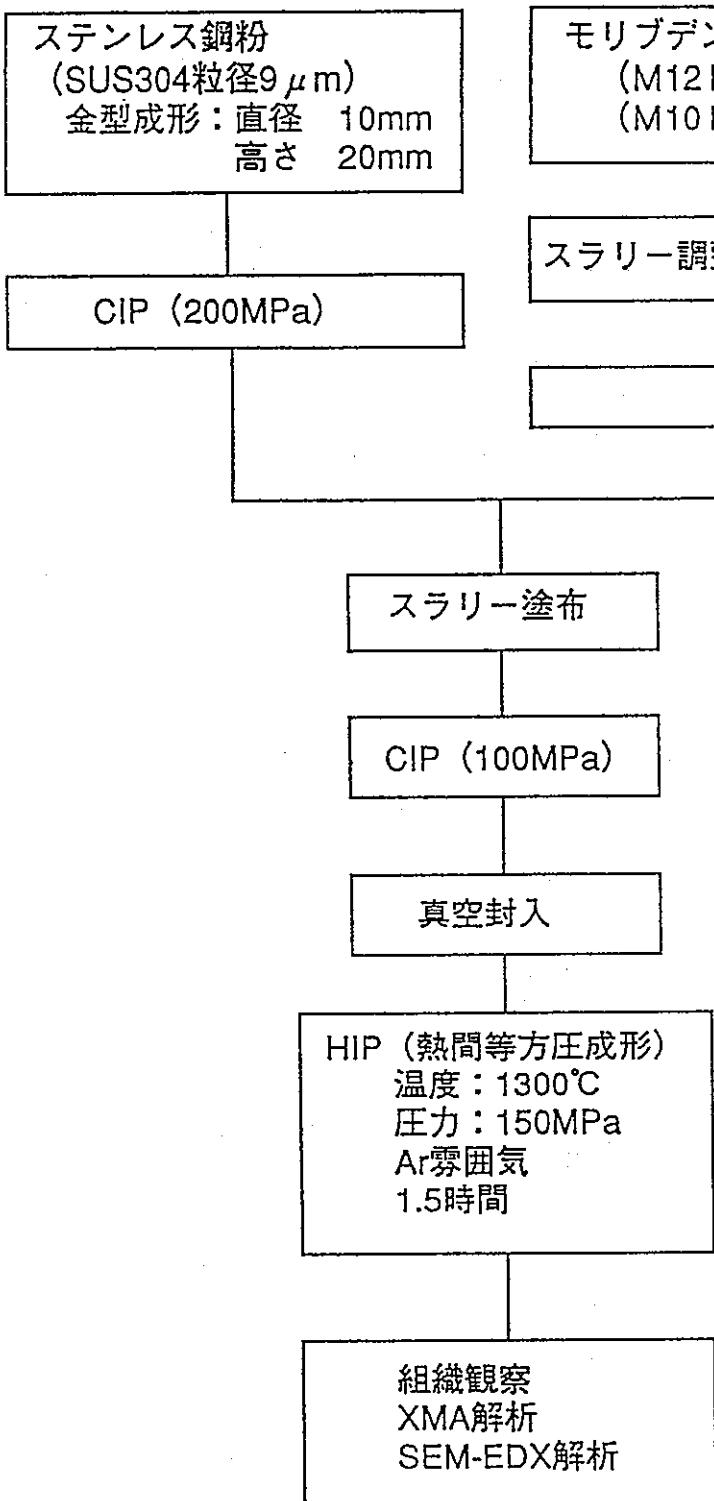
(2) カプセル組立→ダミー粉充填



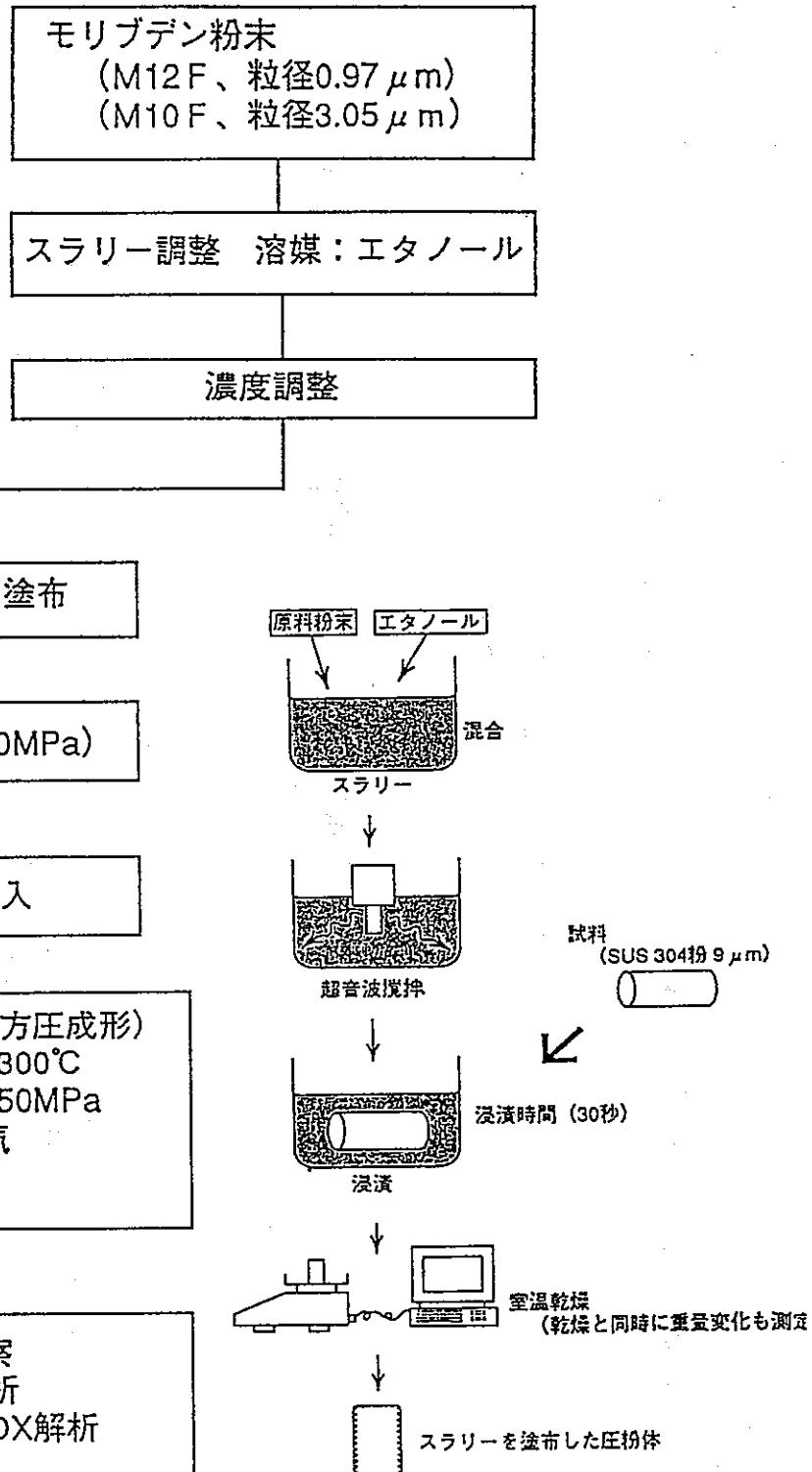


Schematic Diagram of  
Vacuum Plasma Arc Sintering Apparatus

## 基板作製



## スラリー作製



# スラリーディッピング法

## B. 化貯余斗機育能材の倉り製 — 製造プロセスの開発 (B-2)

- (1)粉末積層法 (MA/HIP法) によるPSZ/SUS系円筒状FGMの試作を行った。製造プロセスの詳細工程を図1に示す。本法では形状・寸法制御が困難であり、円筒状FGMの試作には適していないことが明かとなった。
- (2)粉末積層法 (MA/HIP法) によるPSZ/SUS系円盤状FGMの試作を行った。製造プロセスを図2に示す。本法では、セラミックス成分リッチ層の界面間強度が弱く、キャップセル除去時に亀裂が生じること、各層界面の平坦化および肉厚制御が困難であること等が明かとなった。
- (3)MA/真空プラズマ焼結法により円盤状PSZ/SUS系FGMの試作が可能となった。製造プロセスを図3に示す。混合粉末の均一化のためには、組成の違いによるMA条件および焼結条件の最適化が必要であり、健全なFGM製造のためには、多重焼結処理が必要であることが明かとなった。
- (4)スラリーディッピング法による円筒状Mo/SUS系FGMの試作を行い、製造条件の検討を行った。図4に製造プロセスを示す。

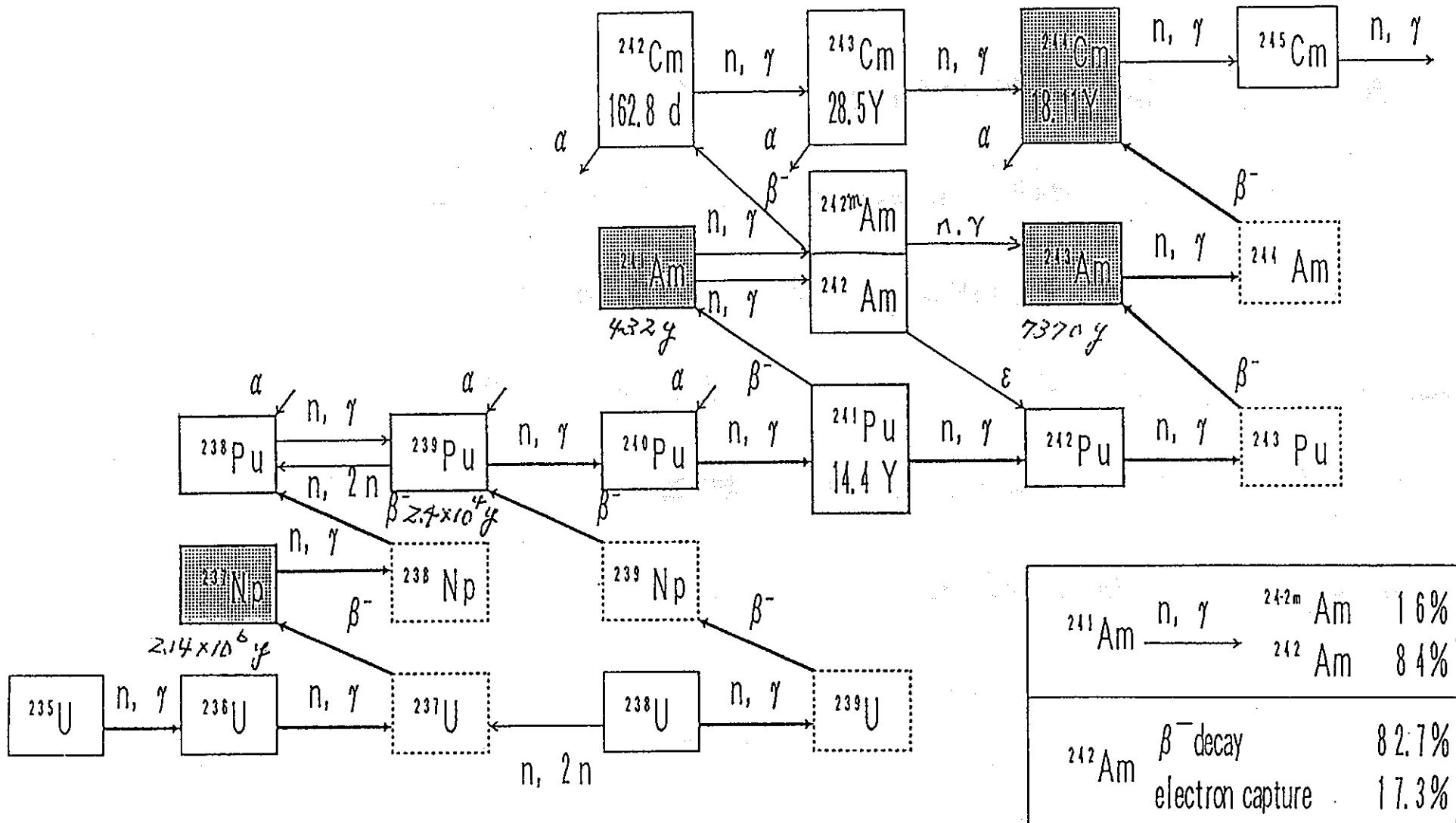
## (C) 遮蔽用透明コンポジットの創製

### < 研究目的 >

高次化プルトニウム燃料および超ウラン元素含有燃料の製造設備で不可欠となる強力な $\gamma$ 線と中性子線を同時遮蔽し、透明度に優れた遮蔽用高性能透明コンポジットを創製するため、材料設計、複合化プロセスの開発、基本特性評価、遮蔽特性評価と複合放射線環境での適用性評価を行う。

- (1) 核燃料サイクルの確立を図る上で、廃棄物処理・処分の効率化は極めて重要な課題である。また、近年核不拡散性をより一層高める等、リサイクルシステムの中で整合性のとれ、社会的受容性の高いシステム概念を構築することの重要性が高まっている。
- (2) 原子炉を運転することで、核反応により核分裂生成物と超ウランTRU元素(Np, Pu, Am, Cm等)が生成するが、このうちPuは、これまで積極的に燃料として利用する体系を考えてきた。Puを除くTRU元素は、 $\gamma$ 線、中性子線の強いものが多く、取扱上の問題もあり、再利用の対象とは考えてこなかった。
- (3) しかしTRU燃料の概念をもちこむことにより、TRU元素の消滅処理を行い廃棄物対策の長期性への不安を軽減することと、あわせてTRU元素を燃料資源として利用することが可能になる。
- (4) こうした観点から、事業団ではTRUをMOX燃料等の一部に混合して高速炉において燃料させ、高速炉の多様性、柔軟性を活かした研究開発の展開を図ることとする。

# TRU燃焼チェーン(actinide build up path)



□内の核種は、生成後直ちに崩壊するものとする

## (D) 表面改質技術の開発

### < 研究目的 >

各種のセラミックス、ステンレス 鋼、フェライト 鋼、耐熱合金等の表面近傍への各種付着、レーザー、電子線等の注入・照射と各種の表面処理・熱処理等との微細組織・構造制御による表面改質技術を開発し、粒界等の不均質性の除去、欠陥等の消滅及び残留引張応力の低減又は圧縮応力の導入による、各種材料のNaに対する耐食性の改善と強度・延性、破壊靱性、耐放射線性の大幅な向上を図る。また、材料表面物性の変化から期待される新機能の発現に関する研究を行う。

## 表面改質技術とは？

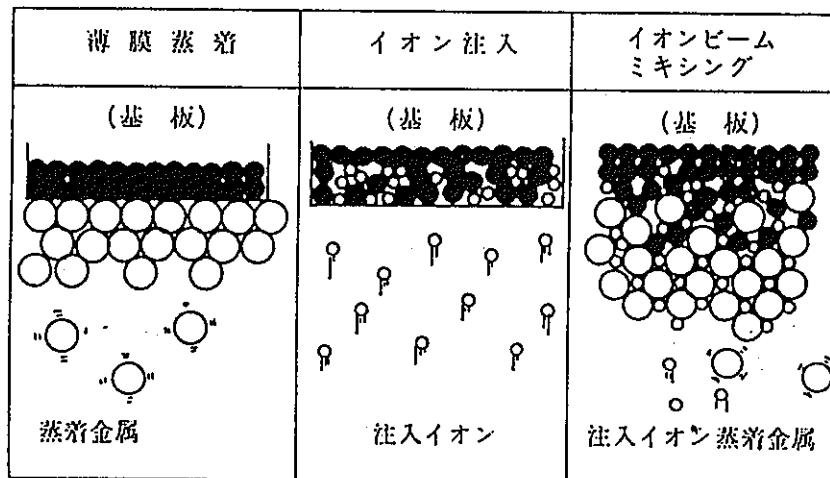
各種イオンやレーザー、電子線等を固体材料の表層に導入し、表層の特性を変換する技術

### イオン注入法

原子をイオン化し、加速した後、固体表面に衝突させて特定の深さに叩き込む物理的な元素添加法

### イオンビームミキシング法

真空蒸着等の成膜プロセスとイオンビーム照射を同時に行なう複合プロセス



# 長所&短所

## イオン注入法の特色

長所	高運動エネルギーによる非熱平衡プロセスである。 制御性がよい。 寸法変化が少ない。 低温プロセスである。
短所	改質層の厚みが薄い。 注入できる元素の種類に制約があり、処理速度も一般に遅い。

## イオンビームミキシング法の特徴(他のドライコーティング法と比較して)

母材との明確な界面が消失することにより、高い密着性が得られる。  
イオンビームの照射方向、エネルギー等による成膜に対する高い制御性を持つ、低温プロセスである。

## 国内外の現状レベル（本計画の技術水準、先見性、類似テーマの有無等）

- ①本研究のようなNa環境で長時間使用に耐える構造部材としてのセラミックスの研究例はない。
- ②傾斜機能材研究会で精力的に研究されているが、高速炉環境を対象とした研究は、本研究を除いてない。
- ③高次化Pu燃料およびTRU 含有燃料における強力な放射線複合環境を対象とした透明遮蔽材の研究例はない。
- ④表面改質技術については盛んに研究されているが、新型プラントへの適用を目的とした研究例はない

## 事業団プロジェクト技術への反映効果

- ①高速炉の高温化、耐放射線化、高信頼化等の高性能化とこれらによる経済性の向上が期待できる。
- ②遮蔽用高性能透明コンポジットの創製により、高次化Pu燃料およびTRU含有燃料の製造を可能とするとともに、被ばくを大幅に低減できる。
- ③核燃料サイクル分野において、セラミックス系コンポジット、それらの複合化技術、接合技術、表面改質技術の新たな用途の拡大とその可能性が明らかになる。

## 効果予測

(社会的、経済的、技術ニーズとの関連、学術的・科学的波及効果)

- ①新型コンポジットマテリアルの創製研究を通じ、学術的・科学的波及効果が期待できる。
- ②新型プラントの高性能化により、経済性を向上できる。
- ③新しい複合化技術、接合技術、表面改質技術等の開発は新型プラントのみならず他産業分野への反映が期待できる。

# 予定している研究交流体制

## 交流委員会内の交流

- ①セラミックスコンポジット中Naの拡散挙動について、無機材研と共に研
- ②セラミックスコンポジットの微細組織構造帯による粒界腐食の抑制について、大学、国研、JFCC、メーカと交流
- ③各種材料の表面改質技術によるNaに対する耐食性向上について、無機材研と共に研
- ④接合技術について、大学、国研、メーカと交流
- ⑤ミクロ物性解析について、無機材研、金材研、原研、大学、メーカと交流
- ⑥各種ベース照射装置の共同利用について、無機材研、金材研、原研TIARA、大学、イオン工学センター、メーカと交流
- ⑦試料提供について、大学、国研、メーカと交流
- ⑧複合化プロセス開発について、大学、国研、メーカと交流

## それ以外の交流

- ①試料提供について、大学、国研、メーカと交流
- ②ミクロ物性解析について、大学、国研、メーカと交流
- ③接合技術について、大学、国研、メーカと交流
- ④複合化プロセス開発について、大学、国研、メーカと交流

## クロスオーバー研究の実績

1. 元年度～4年度 (1) 材料研究交流委員会 8回 (幹事 動燃／原研)
- (2) 研究会 8回 (幹事 動燃／原研)
- (3) 勉強会 2回 (幹事 動燃／原研)
- (4) 国内シンポジウム（於 東京、第Ⅰ期計画の中間成果報告） 1回 (幹事 原研)
- (5) 国際シンポジウム（於 つくば、第Ⅰ期計画の中間成果報告） 1回 (幹事 動燃)
- (6) 海外調査（海外5研究機関とワークショップ開催） 1回 (幹事 動燃)
- (7) 第Ⅰ期計画の中間研究評価 科学技術庁
- (8) 第Ⅱ期計画の事前研究評価 科学技術庁
2. 5年度予定 (1) 材料研究交流委員会 2回 (幹事 動燃／原研)
- (2) 勉強会 1回 (幹事 動燃)
- (3) 国内シンポジウム（クロスオーバー研究第Ⅱ期計画） 1回 (幹事 動燃)
3. 6年度予定 (1) 国際シンポジウム（於 水戸、第Ⅰ期計画の成果報告） 1回 (幹事 原研)
- (2) 第Ⅰ期計画の最終研究評価 科学技術庁

# FEL用高性能鏡の開発

動燃 東海事業所  
核燃料技術開発部 先端技術開発室

北谷文人

# クロスオーバ研究

## 本体技術の開発

原研

超電導加速器を用いたFEL

電総研

発振のための技術協力  
ストレージリングを用いた短波長FEL

## 周辺技術の開発

動燃

FEL用高性能鏡の開発

理研

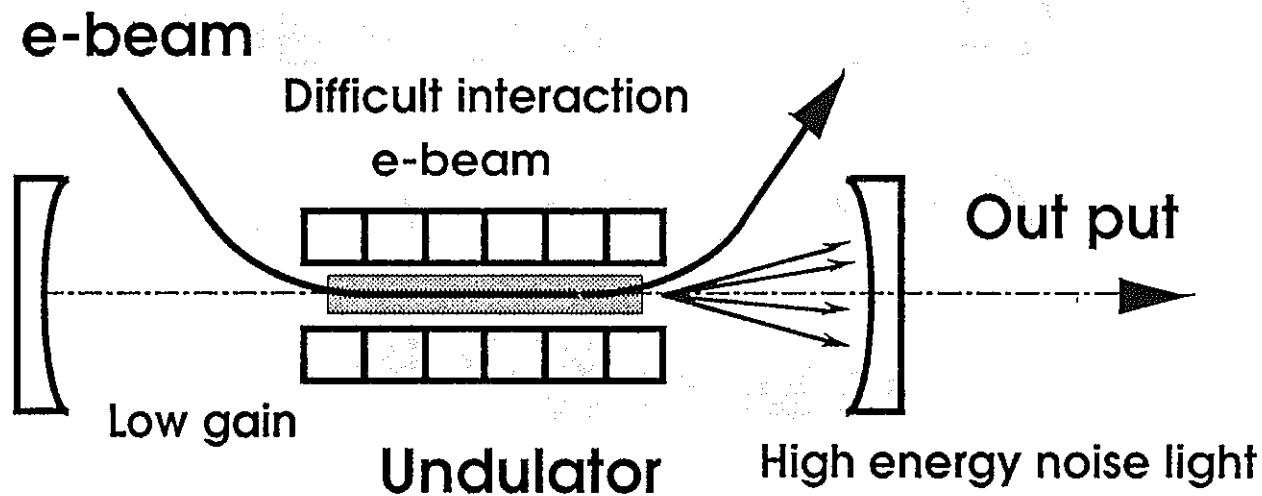
FEL光学系に関する研究

その他大学、メーカー

技術理論的なサポート

# FELにおける光学系

FELでは、その特性上高性能な光学系が必要となる。



高反射率、高光耐力、高精度のアライメント

高効率、高性能なFEL動作のためには、  
今までにない高性能な光学系が必要となる。

# 高性能鏡に必要な コーティング材の条件

高い熱伝導率

広いバンドギャップ

基板とのなじみがよい

平滑で均一な膜面

# 開発目標

FELを実用化するために必要な高性能鏡の開発

可視～紫外域で使用できる短波長用鏡の開発

誘電体多層膜鏡を主眼に開発

低損失 高反射率 高光耐力の光学素子

コート材およびコーティング法の開発

広帯域用の反射光学素子として斜入射光学系

# 実施計画

高性能なコート材の開発

高屈折率材としての硬質炭素膜の開発

短波長域のコート材では高屈折率膜が  
光耐性を下げる

高光耐力の高屈折率膜材の開発

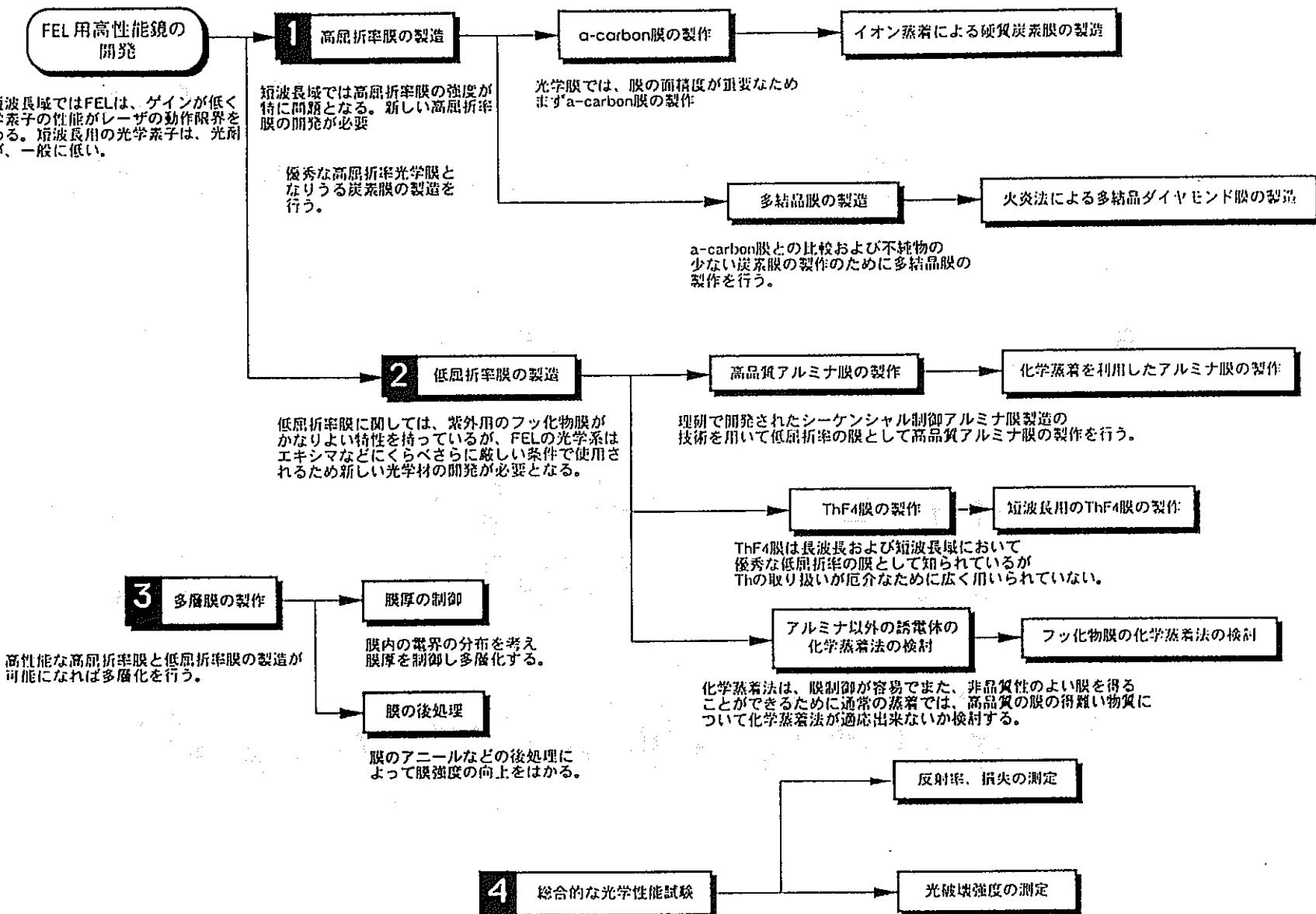
# 現在の高光耐力短波長鏡

膜材として高光耐力のフッ化物を用いる。  
屈折率差が小→膜段数を大→反射率を高くする

屈折率差を大→膜段数を減らした高反射率鏡

誘電体多層膜鏡の光損傷は膜の境界部で生じる。  
膜の段数を減らした高反射率鏡→高光耐力

## FEL用の高性能鏡の研究計画



# 進捗状況

## 光学用硬質炭素膜の開発

イオン蒸着法を使って短波長光学素子のために  
硬質炭素膜(アモルファス炭素膜)生成の試験を行った。

## 高性能膜生成のコーティング法の開発

クリーンブースなどの環境整備  
フッ化物膜生成CVD装置の設計製作

## 製膜状態の評価装置の整備

## 光学素子としてのダイヤモンド

ダイヤモンドは高い熱伝導率(**5~8W/cmK**)とバンドギャップ(**5.48eV**)を持ち広範囲の波長域で透明な(IR~UV域にかけて透明)高屈折率(**2.4**)の材料である。

広い波長域で用いることのできる理想的な  
光学材料

光学精度の薄膜を合成することが必要

# ダイヤモンド膜合成

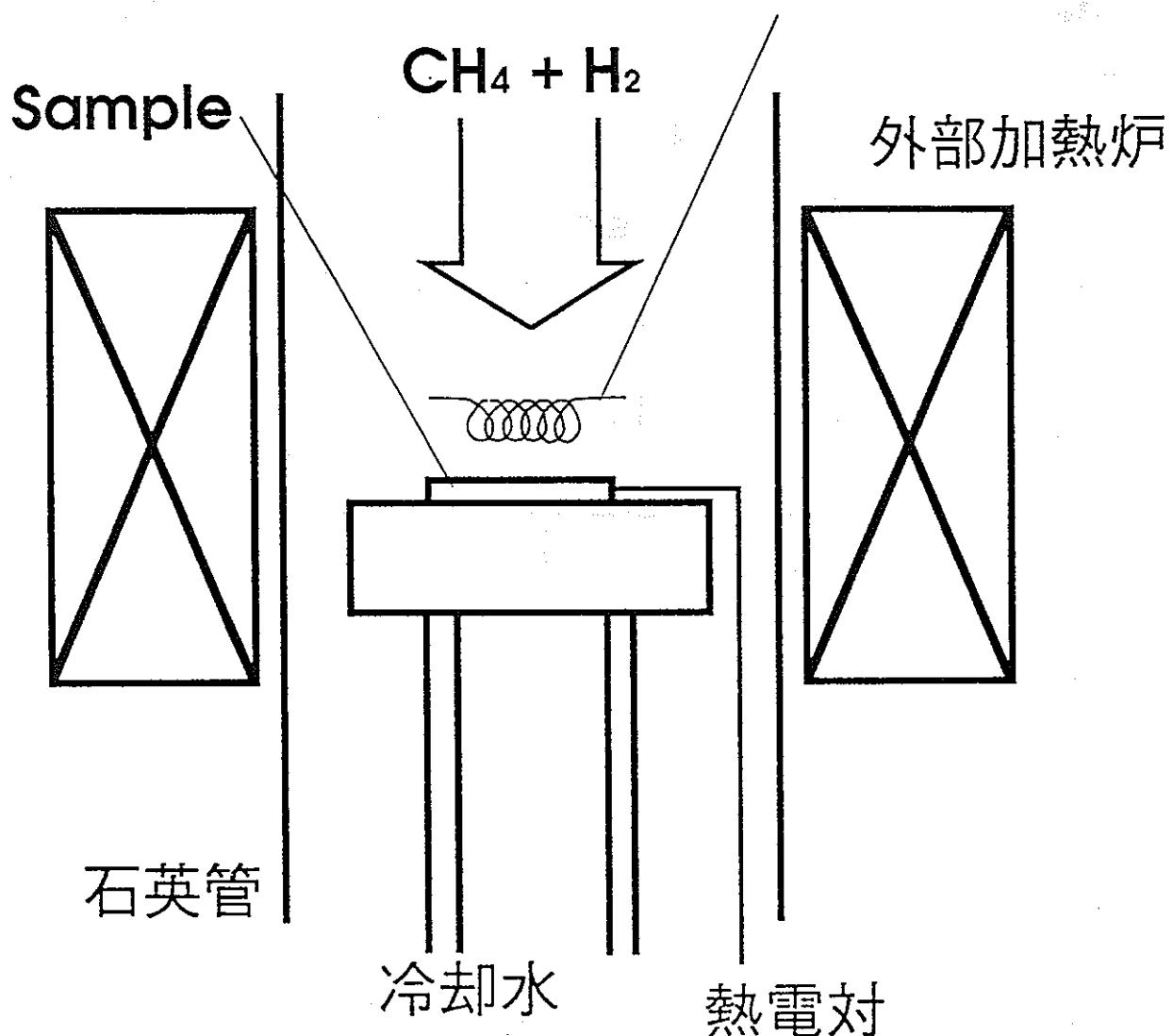
## a. 熱フィラメントCVD法

### 基本的な低圧気相合成法

1982年 無機質材料研究所 松本、瀬高らによって考案

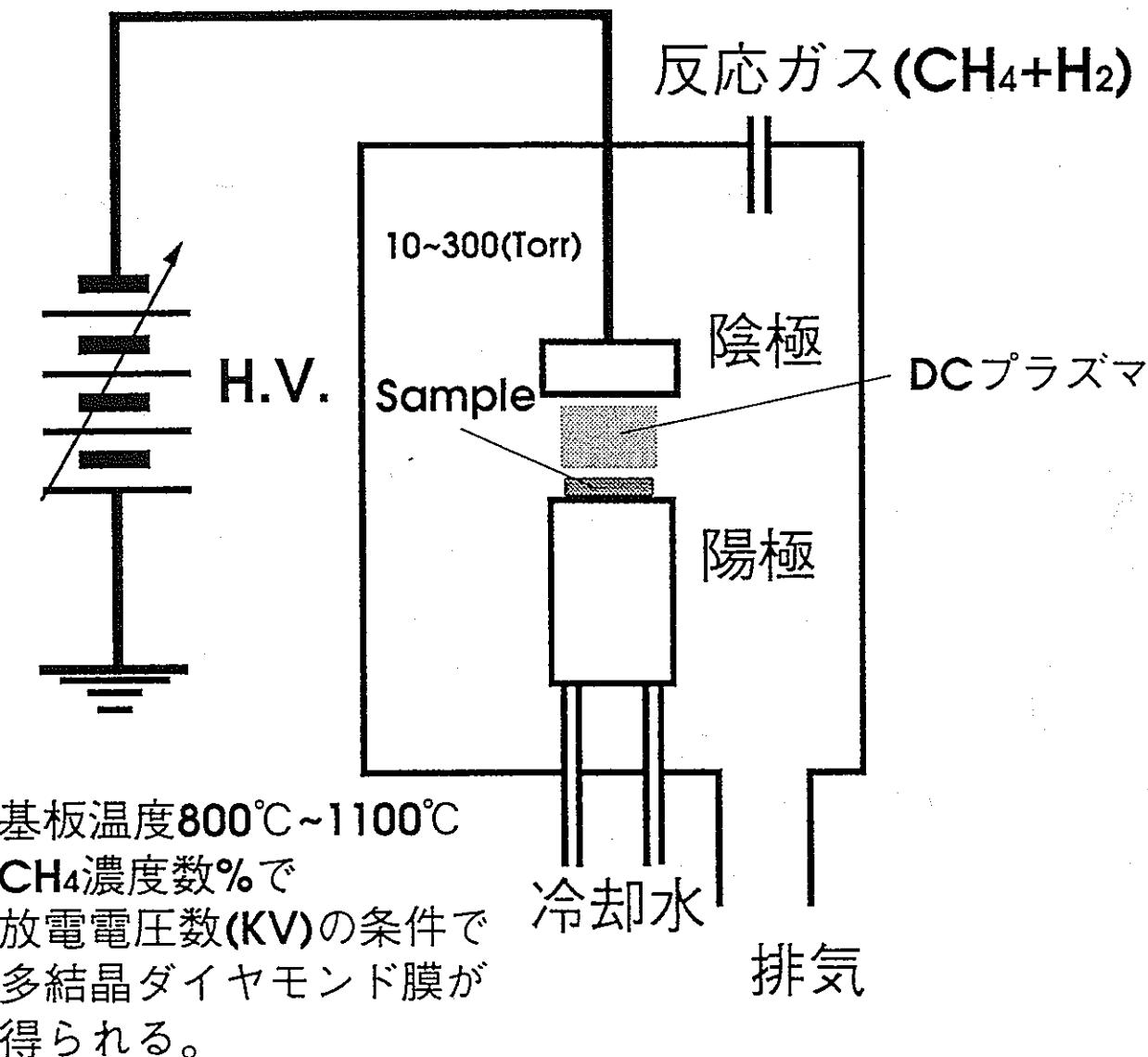
CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>の混合ガスを10~100(Torr)で流入し外部より700~1000°Cに加熱を行う。さらに、基板上方に熱フィラメントを置きこれを2000°C程度に加熱し基板上にダイヤモンドを生成させる方法

熱フィラメント(W,TaC etc.)



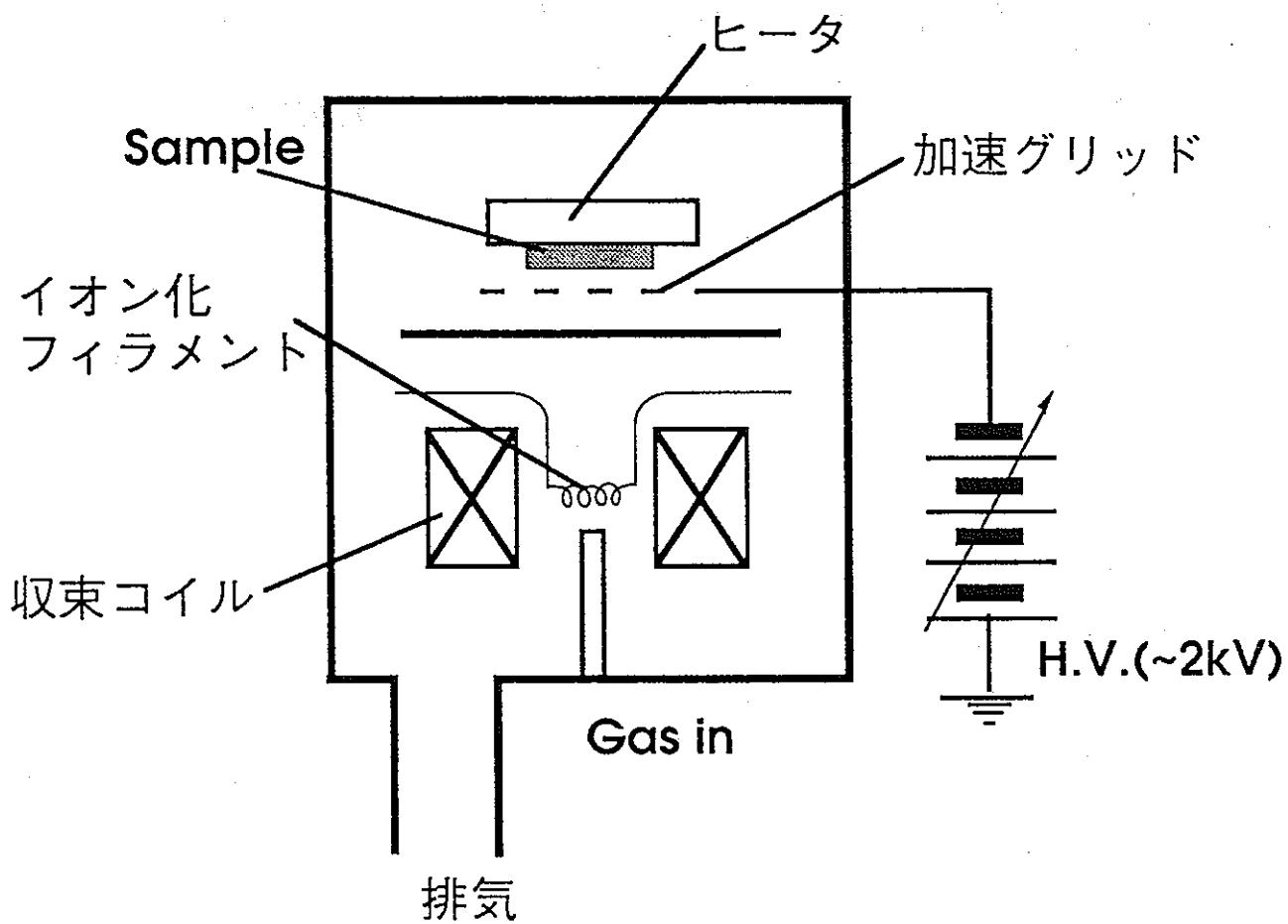
## b. 直流プラズマCVD法

装置の構造が簡単でダイヤモンドの生成の条件が緩いと言う特長をもつ。  
また、150mm/h程度と比較的早い膜生成速度を得ることができる。



## c. イオン化蒸着法

イオン化蒸着法は、CVD法とは異なり炭素を含むイオンを加速して基板に衝突させることにより局所的に高温高圧状態を創りダイヤモンドを生成する方法である。この方法は、ダイヤモンドの単相膜は、得られてはいないが、基板温度が、室温程度でも平滑な硬質炭素膜が生成する。このため、平滑な光学用膜を生成するためには、良い方法と考えられる。



# ダイヤモンド膜の評価

## a. 膜構造の評価

ダイヤモンド膜を合成する際、炭素にはいくつかの 同素体が存在するために膜の構造の評価が必要となる。

特に低温低圧合成法の場合、ダイヤモンドのほかに、無定形炭素(**i-carbon**)が生成

光学的に良い膜がどのような膜であるかを評価するためにも膜の構造解析は、重要

炭素の同素体の評価は、ラマン分光  
電子線回折などによって行われる。

とくに、炭素のラマンスペクトルは、顕著な構造敏感性を示すため、構造評価に重要な手法である。

## a. 膜物性の評価

光学用ダイヤモンド膜として重要な物性

1. 平滑度、膜厚の均一性
2. 屈折率
3. 吸収スペクトル
4. 熱伝導度
5. 基板との付着力
6. 光破壊強度

などがあげられる。

これらの物性の評価としては、

1. 平滑度、膜厚の均一性の評価
2. 屈折率

これらは、エリプソメータによる橙円偏光解析によって評価出来る。

### 3. 吸収スペクトル

薄膜は吸収が微小なため吸収スペクトルの測定は、難しい。正確な吸収スペクトルの測定は、特殊な方法(PASなど)で行う必要がある。

#### 4. 熱伝導度

熱伝導度が大きいことは、膜の熱的破壊と熱による光学系の変形を防ぐために高出力レーザ用光学材として重要なファクターとなる。この評価は、サーモグラフィーを使った直接評価や光照射ACカロリメトリ法によって行われる。

#### 5. 基板との付着力

これは、一般に数値化の難しい。この評価は、粘着テープなどによる引きはがし法や金属針などによる引っ掻き法によって評価される。

#### 6. 光破壊強度

この評価が、膜の寿命などをきめる。これは、通常実際のレーザ照射による破壊試験によって評価される。破壊しきい値の決定は、顕微鏡観察によるもの、散乱光強度変化によるもの、AEの変化によるものなどがある。

# PNCでのダイヤモンド膜開発の現状

## 1. 膜合成について

膜の合成法は、光学精度の膜面が得られる  
と考えられるイオン化蒸着法を採用  
原料のイオン化に放電を用いた方法で装置  
の作製を行った。

数種の基板上に蒸着試験を行い $\text{SiO}_2$ 上に  
透明な絶縁体膜の合成に成功。  
評価の手法が整っていないために構造等に  
については、不明。

## 2. 膜評価について

膜の評価については、評価装置の整備中で  
以下の方法で評価を行う予定

膜構造評価 ラマン分光

膜厚、屈折率評価 自動エリプソメータ

機械的強度 マイクロ硬度計

熱伝導度 光照射ACカロリメトリ法

光破壊強度 光音響法

# ダイヤモンド膜開発の今後の計画

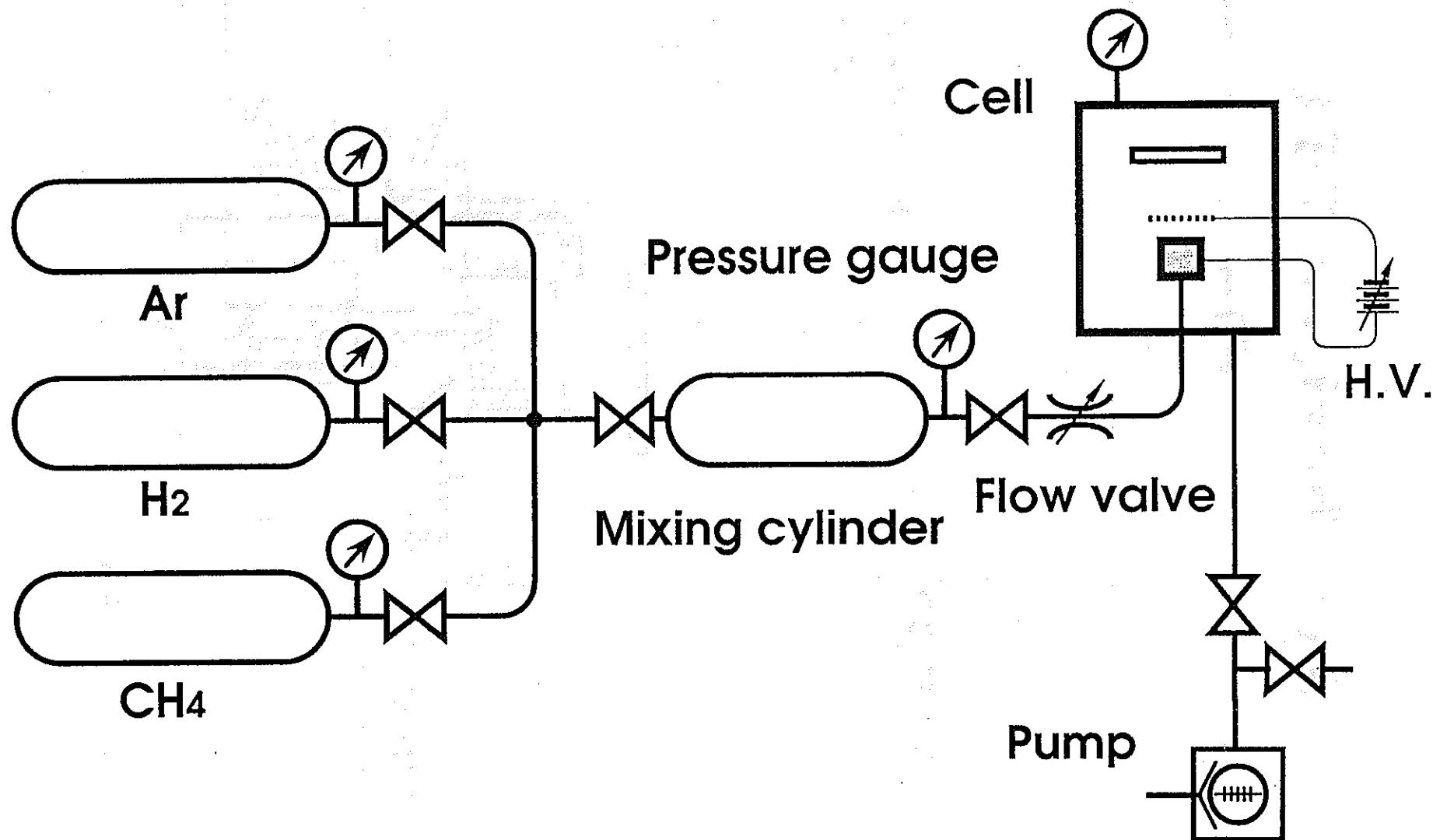
1. 膜の評価法の確立
2. 単層膜での光破壊強度の測定  
IR, 可視, UV, 極短パルスUV

3. 膜の多層化  
低屈折膜との組み合わせ  
シーケンシャル制御Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜との  
組み合わせによるAR, HR膜の製作

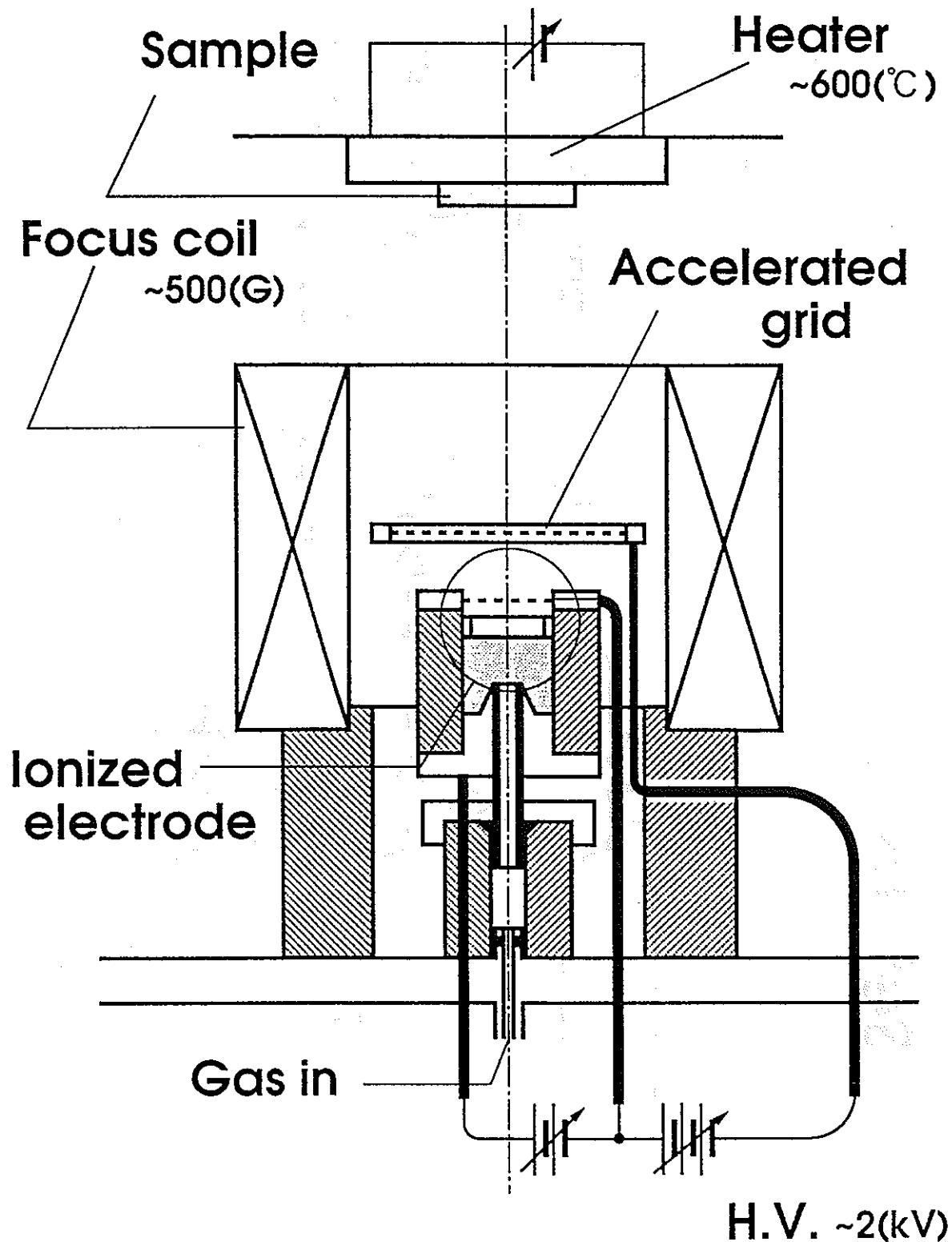
FEL用高性能鏡の開発の基礎データとする。

# Set Up

- 150 -



# Synthesized DLC film system



# 膜生成の条件

## 共通条件

基板  $\text{SiO}_2$

磁場 ON

Ar 5(min) エッチング

イオン化電極 600(V)

加速電極 1.5(KV)

Cell pressure 20(mTorr)

## SampleA

$\text{CH}_4:\text{H}_2:\text{Ar}=0.25:1:1.75$  total 3(atm)

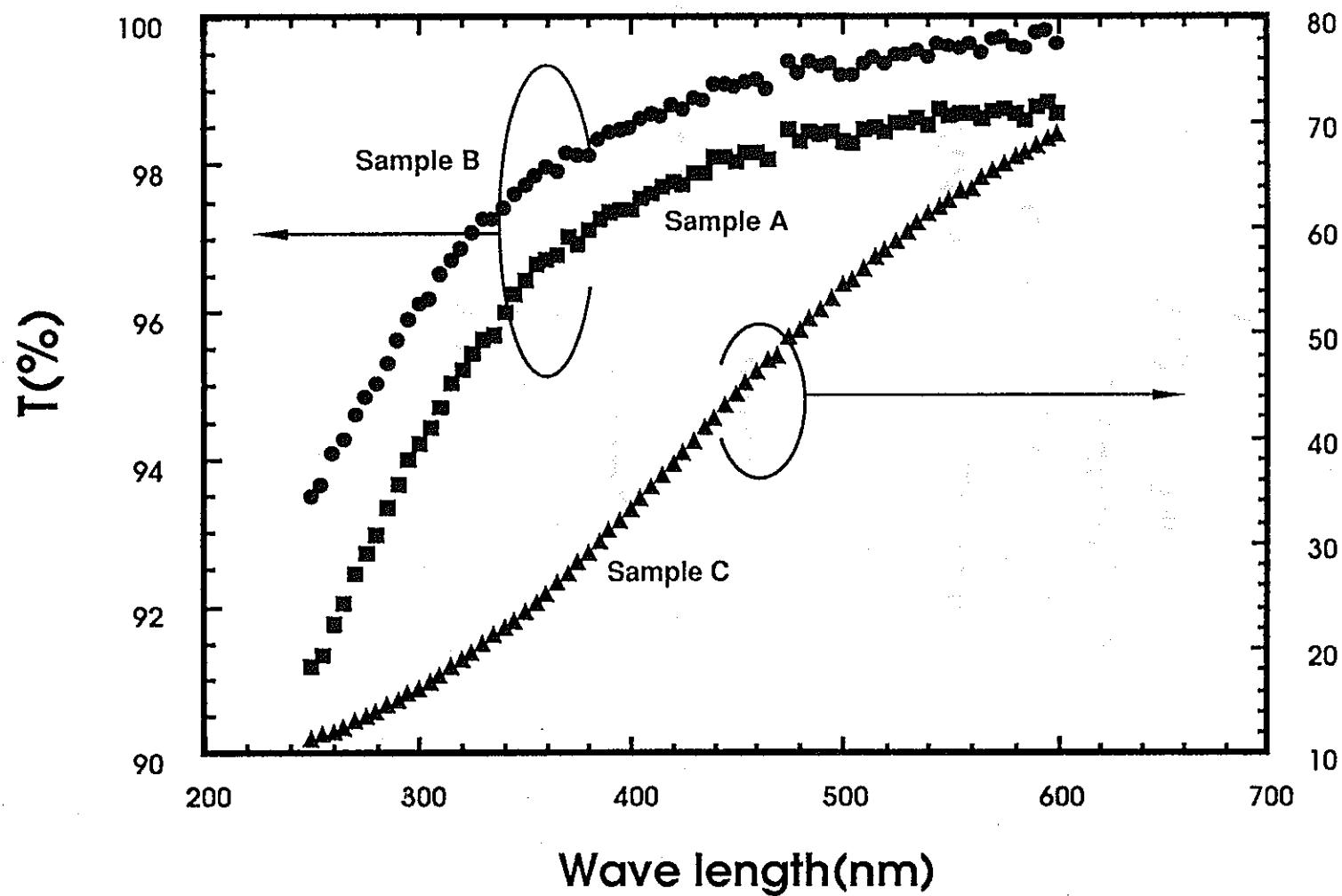
## SampleB

$\text{CH}_4:\text{H}_2:\text{Ar}=0.25: 0.75: 2$  total 3(atm)

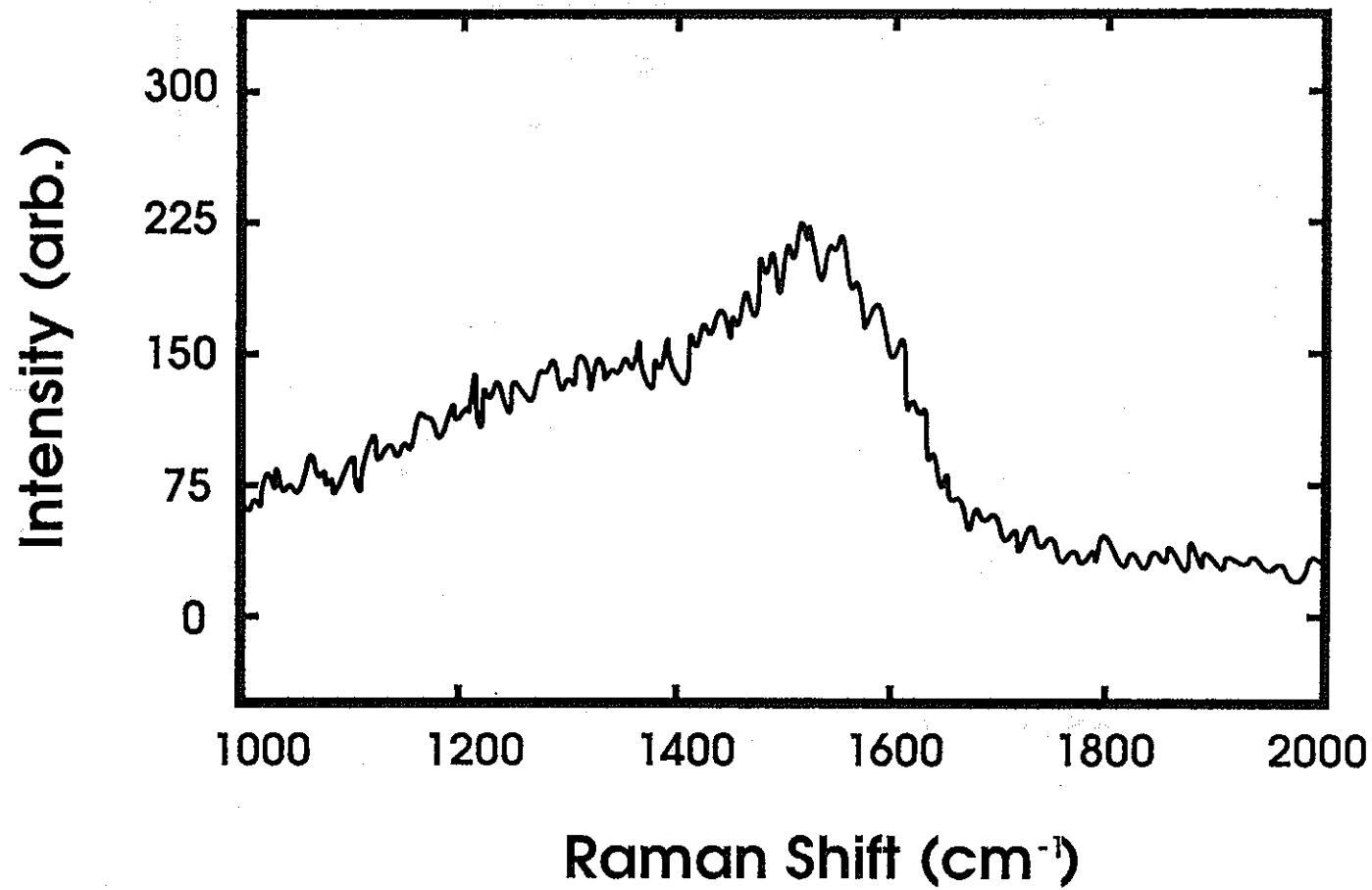
## SampleC

$\text{CH}_4:\text{H}_2:\text{Ar}=0.25: 0.5: 2.25$  total 3(atm)

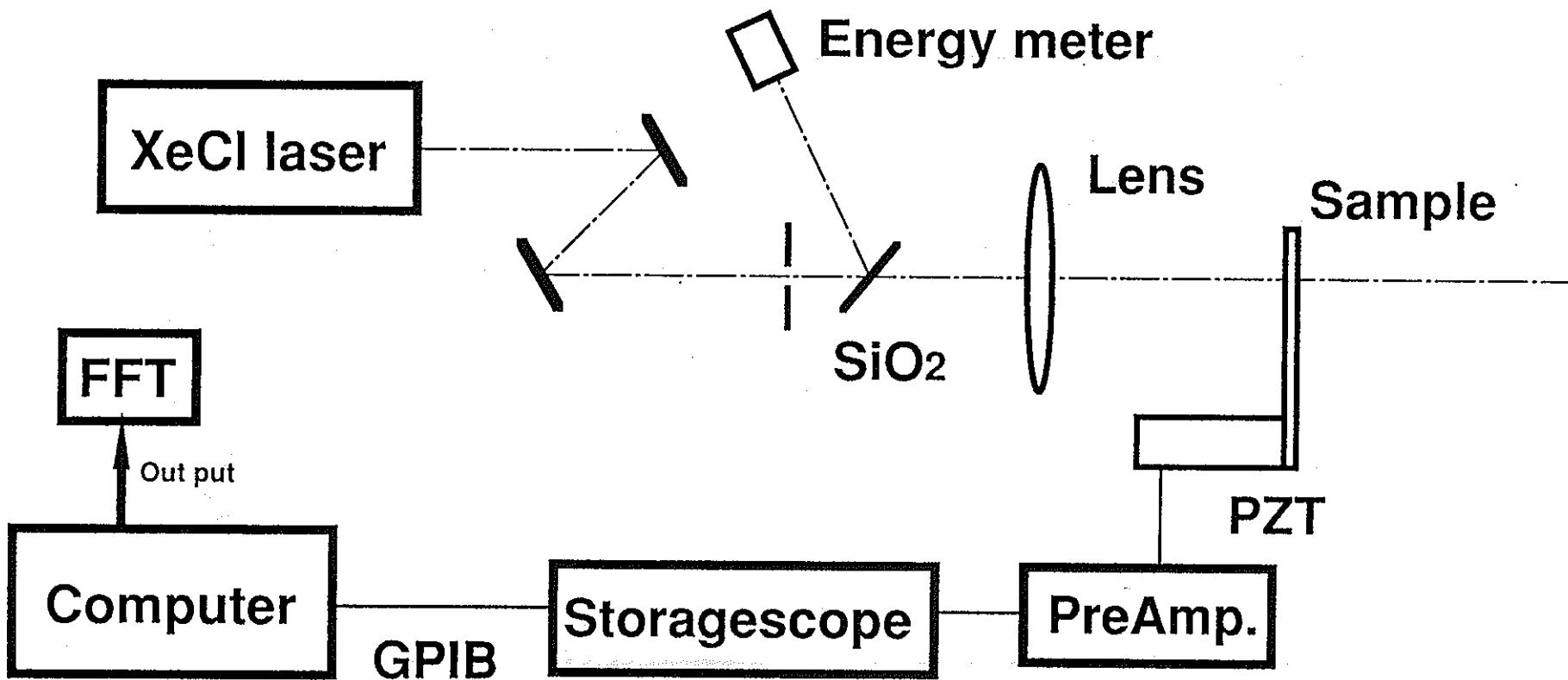
## Absorption Spectrum

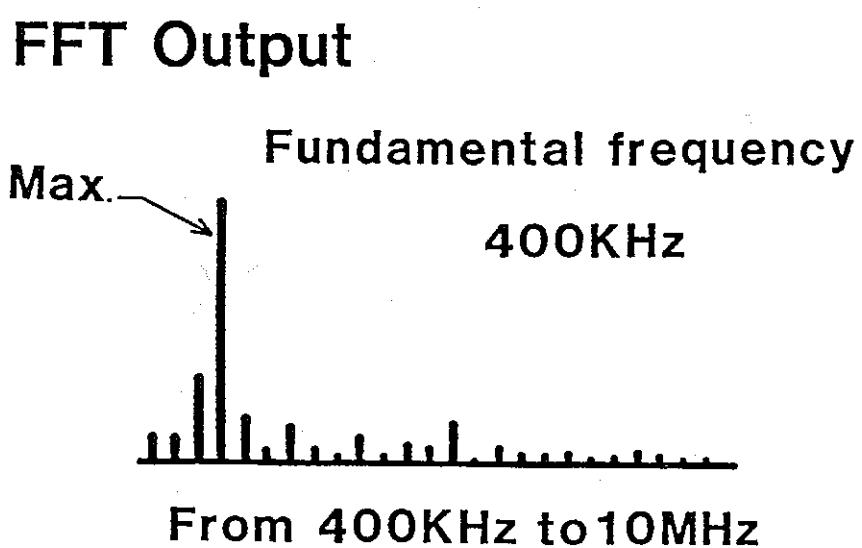
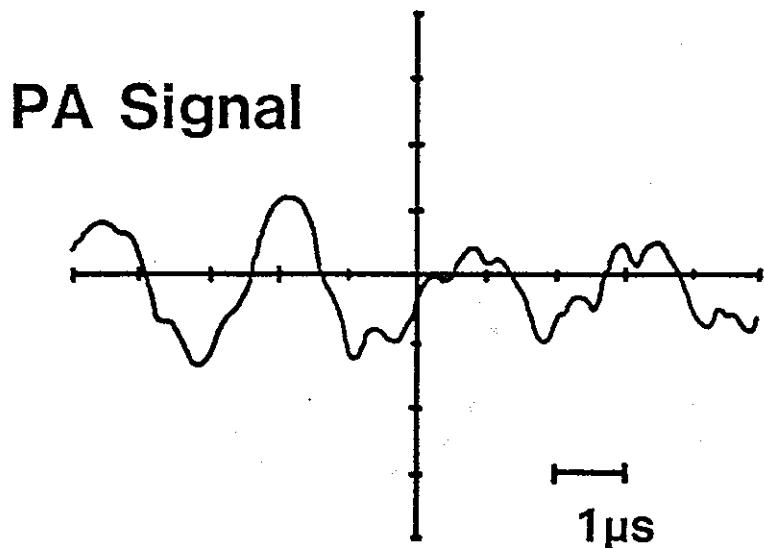


# Raman Spectrum of Carbon Thin Film

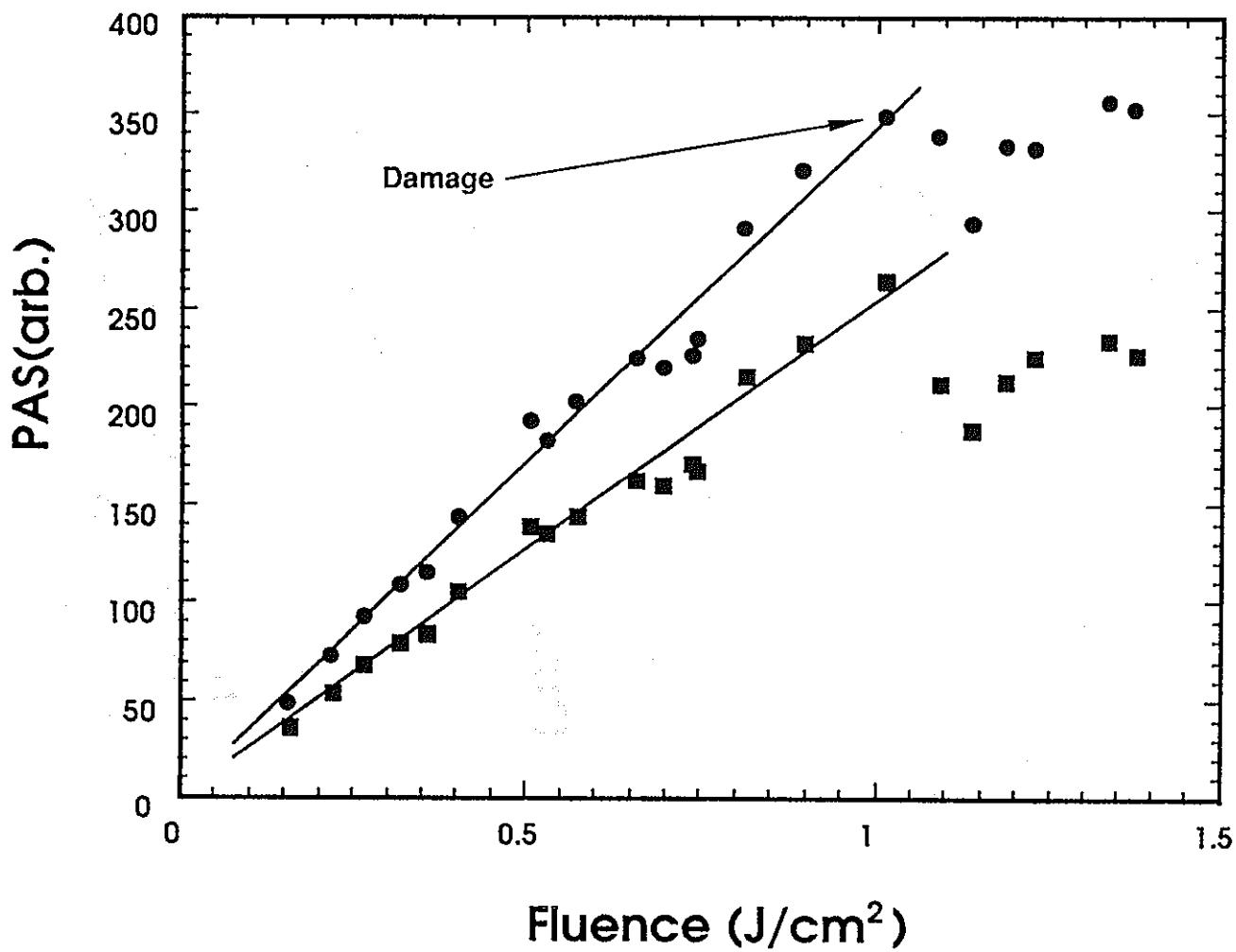


# Set Up

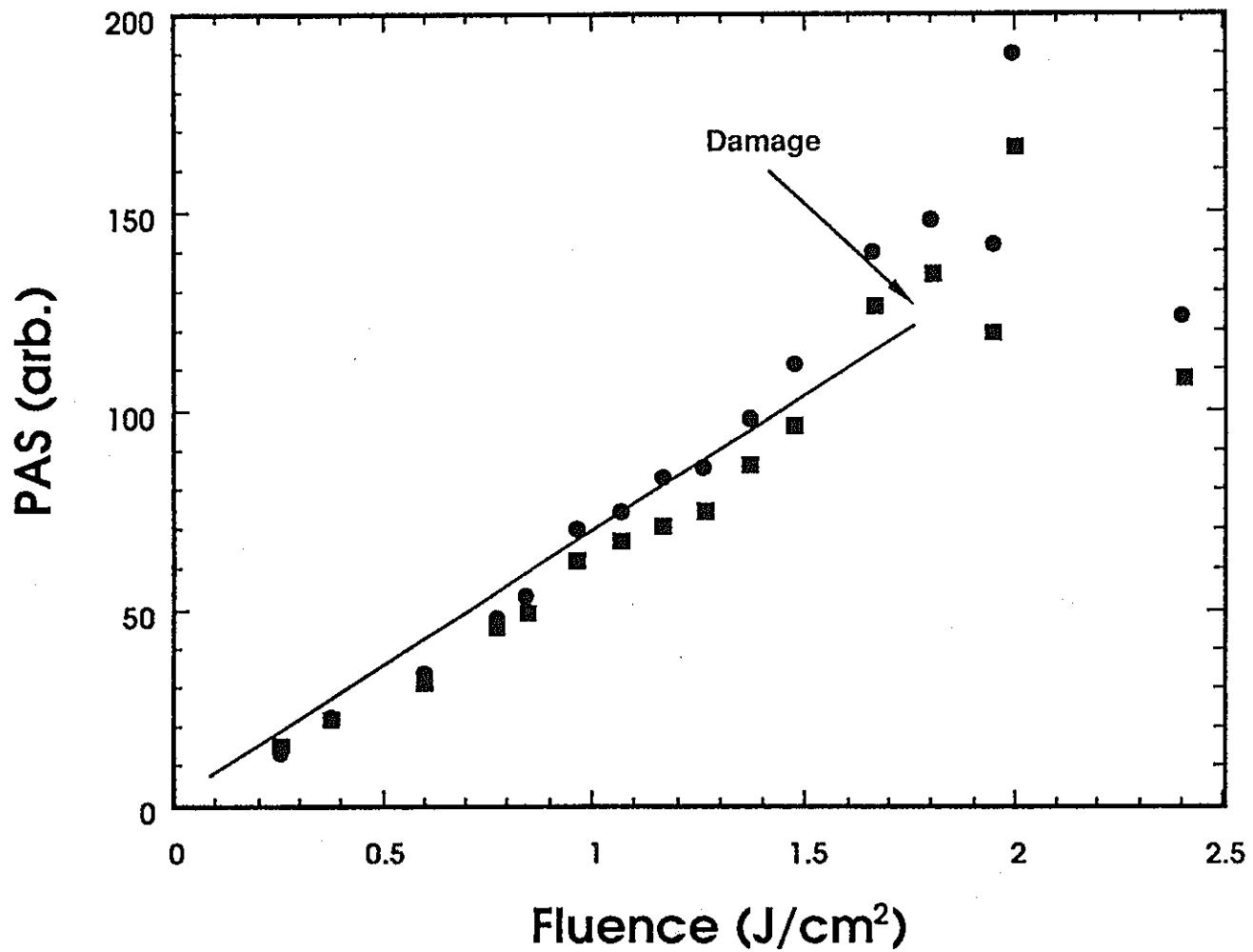




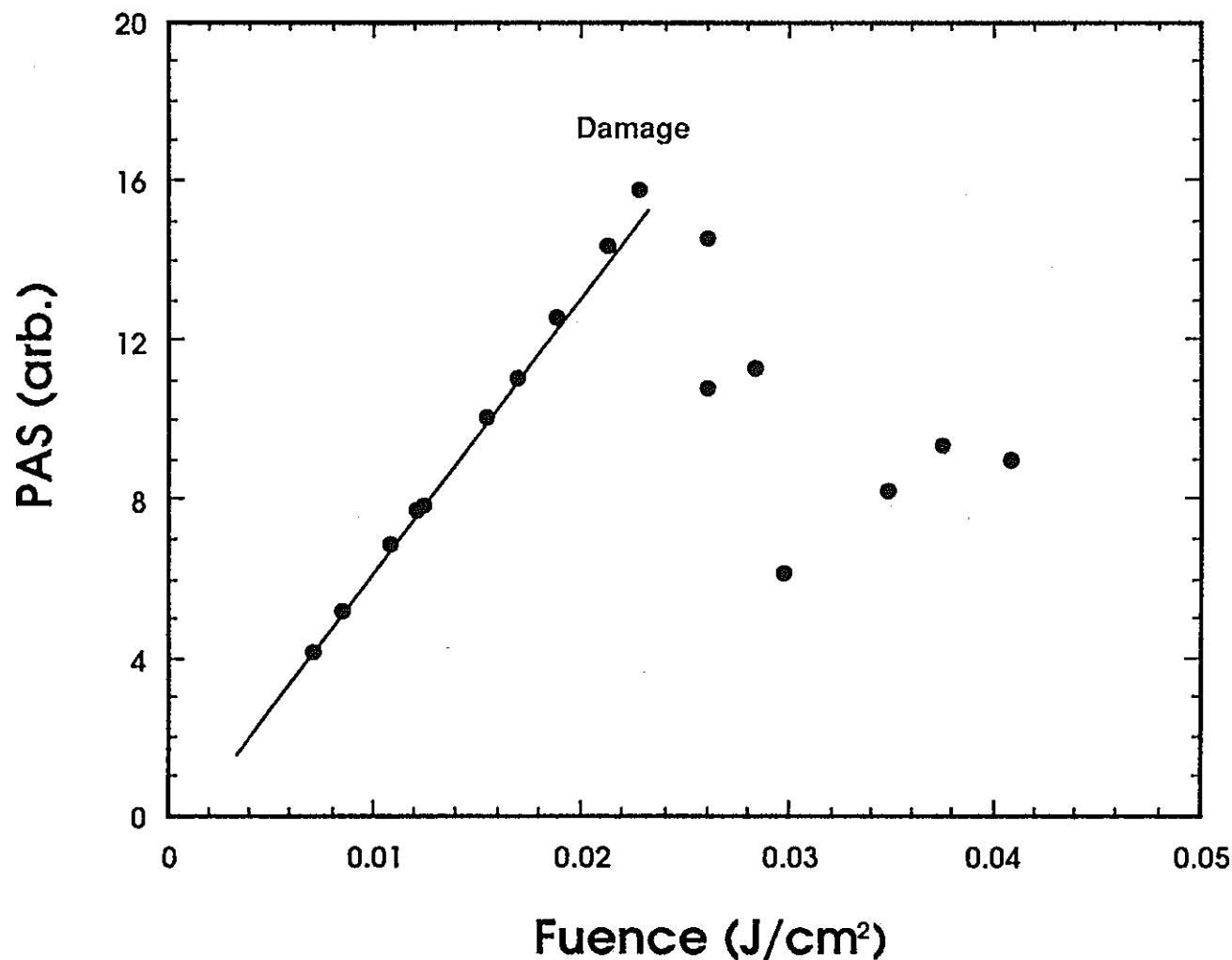
# Sample A



## Sample B



## Sample C



# FELに必要とされる光学素子

高反射高耐力鏡

高性能誘電体多層膜鏡

低吸収高光耐力コーティング技術の開発

非球面斜入射鏡

超精密切削技術

プラズマエチングなど

大型結晶基板成長技術

**SiC,Si,BN等の基板**

反射率のエンハンシング

# 高性能膜生成のコーティング法の開発

現在のコーティング法は、**e-beam**蒸着法が主流

**e-beam**蒸着法は、FELなどの極限的レーザに用いる

高品位な膜は得づらい

高品位な膜を生成するために物理蒸着ではイオンビームアシスト蒸着などの蒸着物質により大きなエネルギーをあたえ基板への付着を高めた蒸着法が用いられている

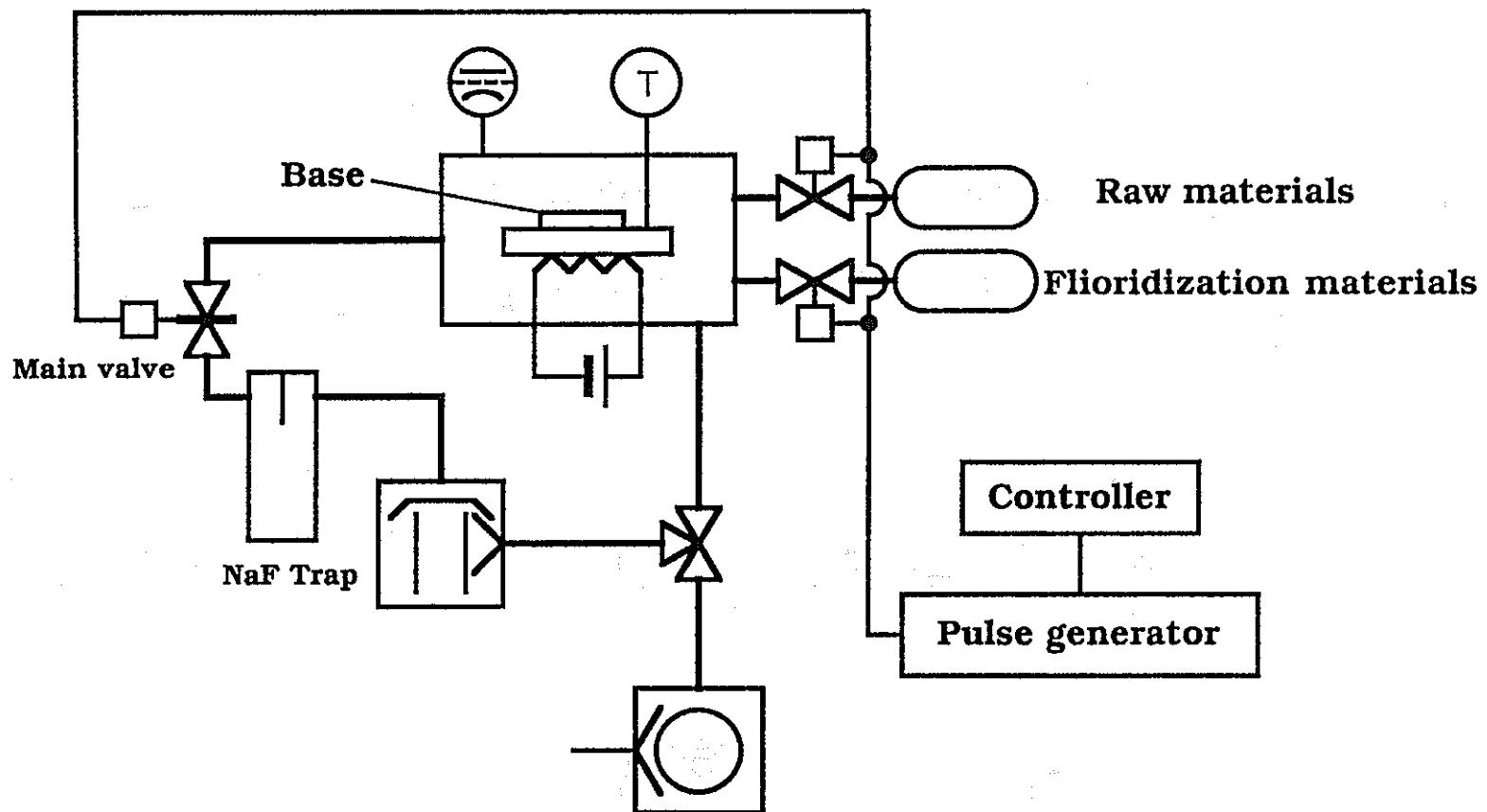
## 新しい蒸着法の開発

光学膜以外で良く用いられる製膜法であるCVD法  
(気相化学生成法)による光学膜の生成を行う

理研で半導体用絶縁膜用に開発されたシーケンシ  
ヤル製膜法とMO膜生成に用いられている熱分解  
法を応用することを考える

特に優秀な低屈折率膜であるフッ化物膜のCVD法  
による生成を行う

# Synthesized fliorization thin film system



## Step 1

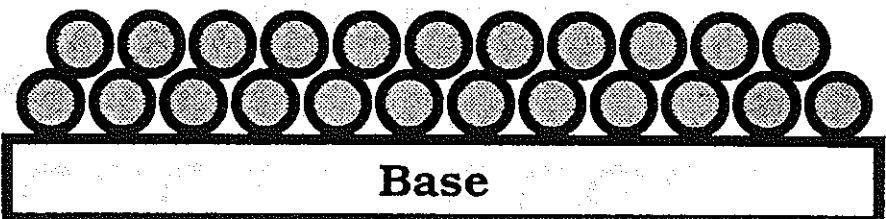
Heat

Vacuum



## Step 2

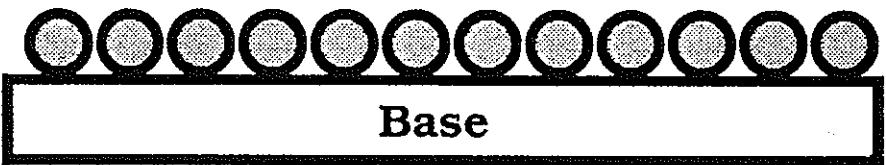
Introduce  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$



## Step 3

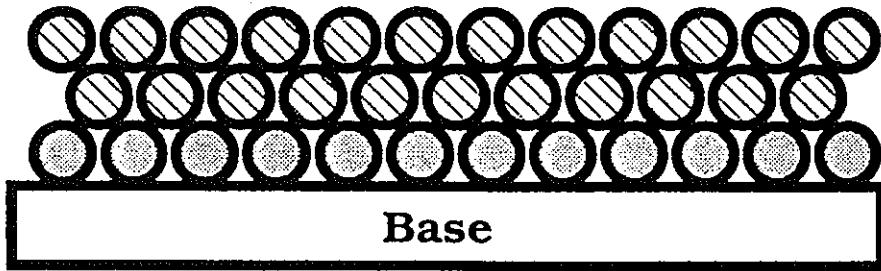
Vacuum

Adsorption layer

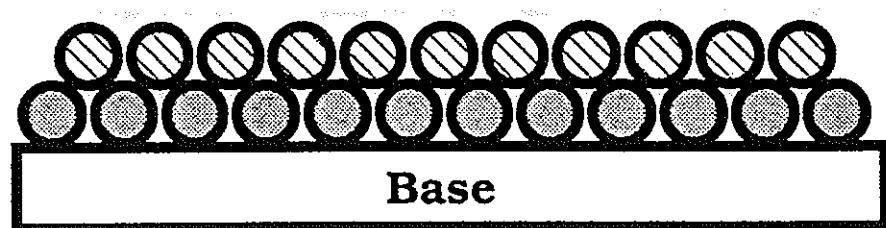


## Step 4

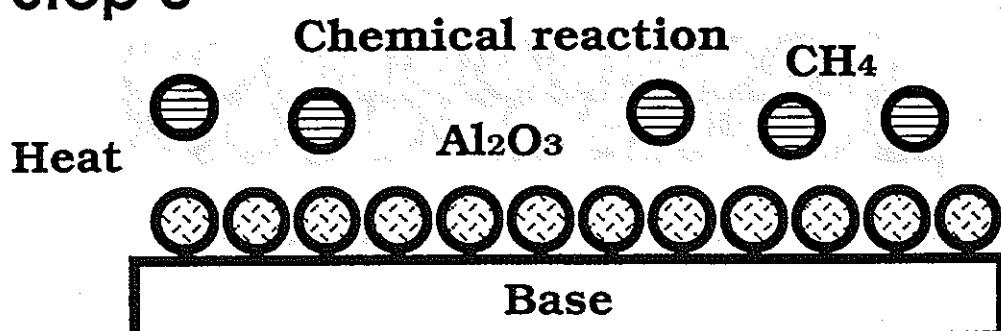
Introduce  $\text{H}_2\text{O}$



**Step 5**      Vacuum      Adsorption layer

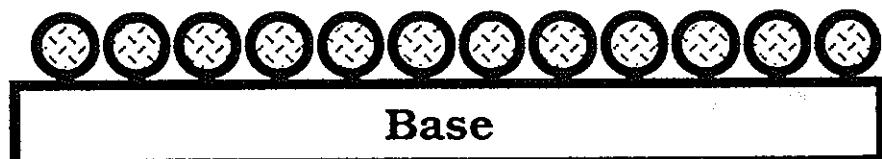


**Step 6**



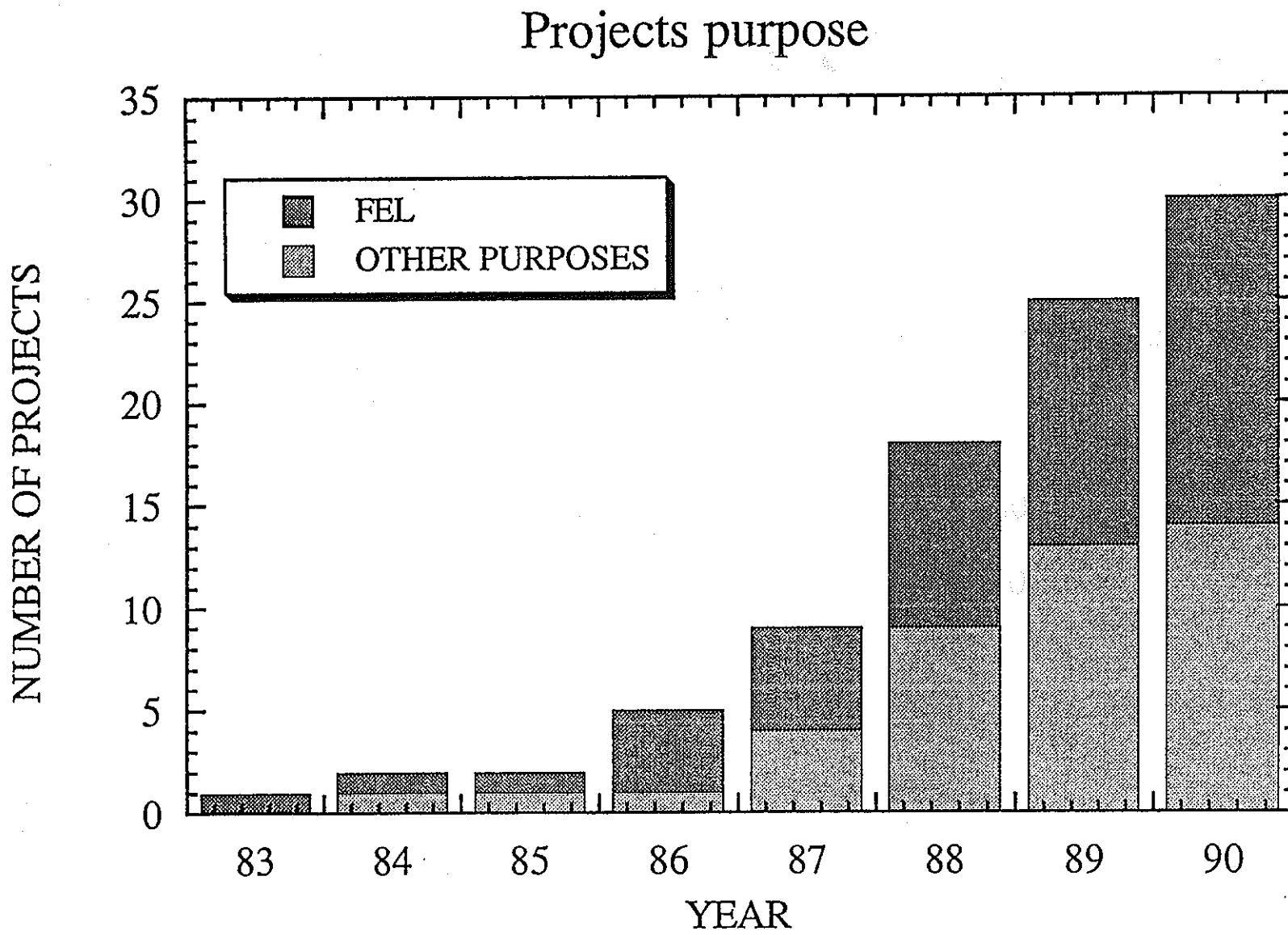
**Step 7**

Vacuum       $\text{Al}_2\text{O}_3$



## 問題点

試作品に関しては内部実施がある程度可能であるが実用品を製作する際には製作のためにメーカー等の技術的協力が不可欠になる。

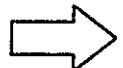


## Free Electron Laser

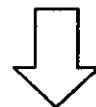
	IR	Visible	XUV	X - RAY
Peak current [A]	> 20	> 50	> 100	> 200
Norm. emit. [ $\text{p}\text{a}\text{i}$ mm mrad ]	60 ~ 500	20 ~ 60	3 ~ 20	< 3

-168-

High Peak current  
Low Emittance

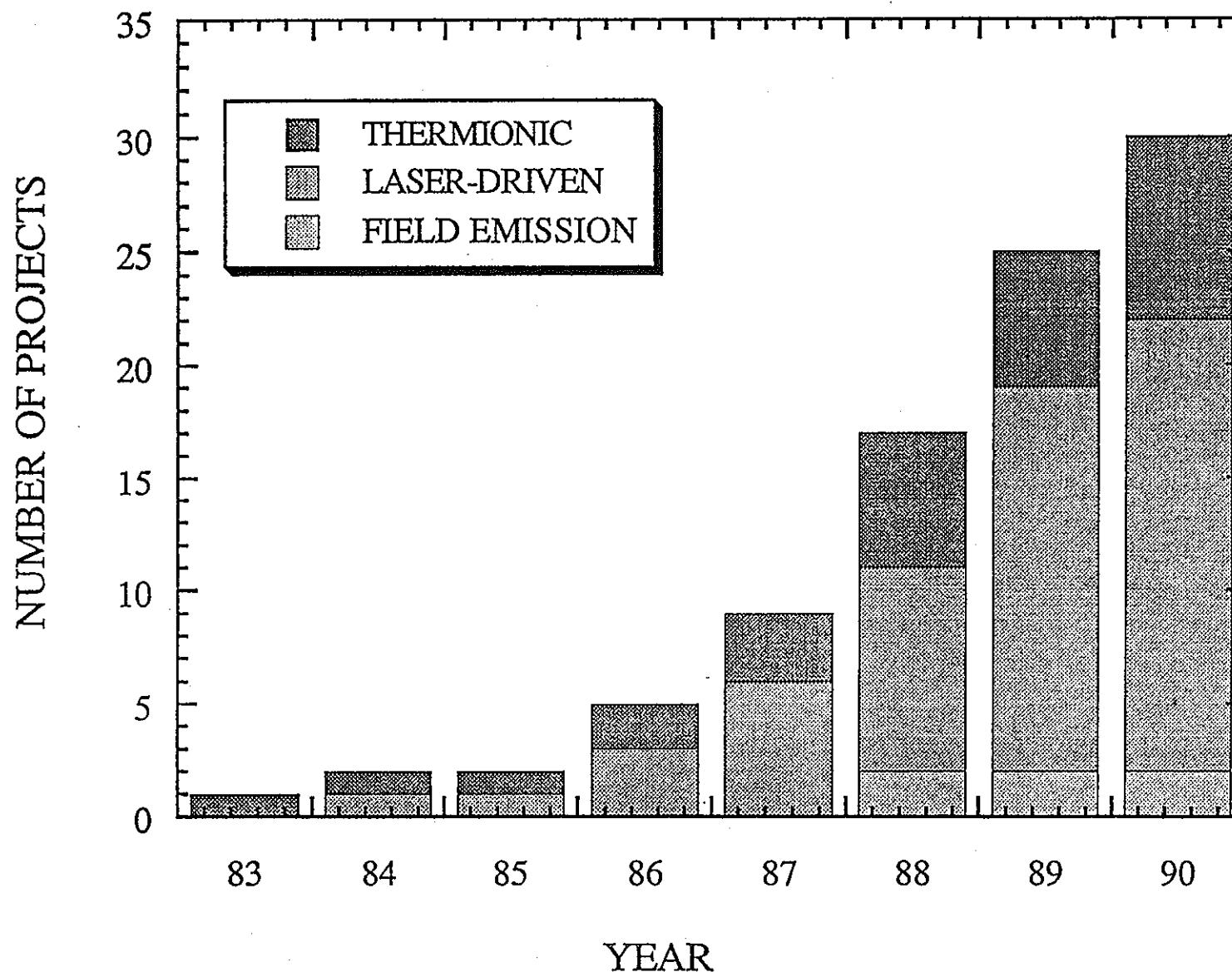


very short bunch production from the cathode  
high accelerating gradient



**RF Gun**

## RF gun projects



## 熱陰極マイクロ波電子

長所	制作が容易。
<hr/>	
短所	ビームのエネルギー幅が大きい。 逆行する電子による衝突。

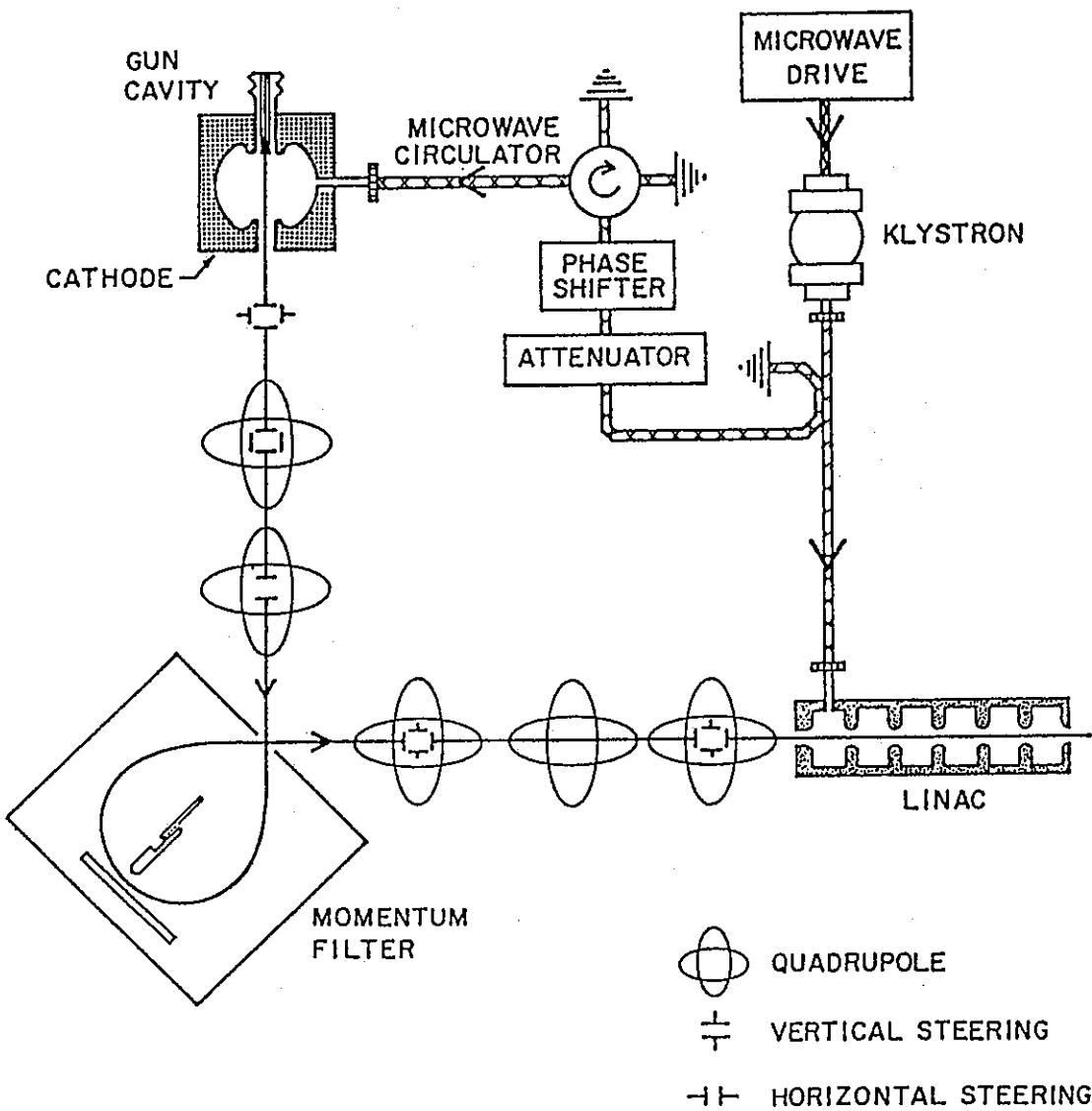
## 光陰極マイクロ波電子

長所	エネルギー幅・位相幅ともに狭いバンチビームが得られる。
<hr/>	
短所	陰極の寿命が短い。

## Thermionic RF Gun

	Duke	Beijing
CATHODE	<i>LaB6</i>	<i>LaB6</i>
CATHODE AREA [cm <sup>2</sup> ]	$7 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-2}$
NUMBER OF CAVITIES	1	1
FREQUENCY [MHz]	2857	2856
MAX ON AXIS FIELD [ MV/m ]	50	50
MAX SURFACE FIELD [ MV/m ]	100	100
FIELD AT CATHODE [ MV/m ]	30	30
MACROPULSE LENGTH [ $\mu$ s ]	8	2
MACROPULSE FREQ. [ Hz ]	15	12.5
KINETIC ENERGY [ MeV ]	0.9	0.9
CHARGE [ nC ]	0.07	0.08 ~ 0.1
RMS MICROPULSE LENGTH [ pS ]	2 ~ 5	4 ~ 5
MICROPULSE FREQ. [ MHz ]	2857	2856
PEAK CURRENT [ A ]	15 ~ 35	10 ~ 20
NORM. EMIT. [ $\pi$ mm mrad ]	10	30
TOTAL ENERGY SPREAD [KeV ]	200	200
NORM. BRIGHT. [ $10^{10}$ A/m <sup>2</sup> rad <sup>2</sup> ]	17.7	1.35

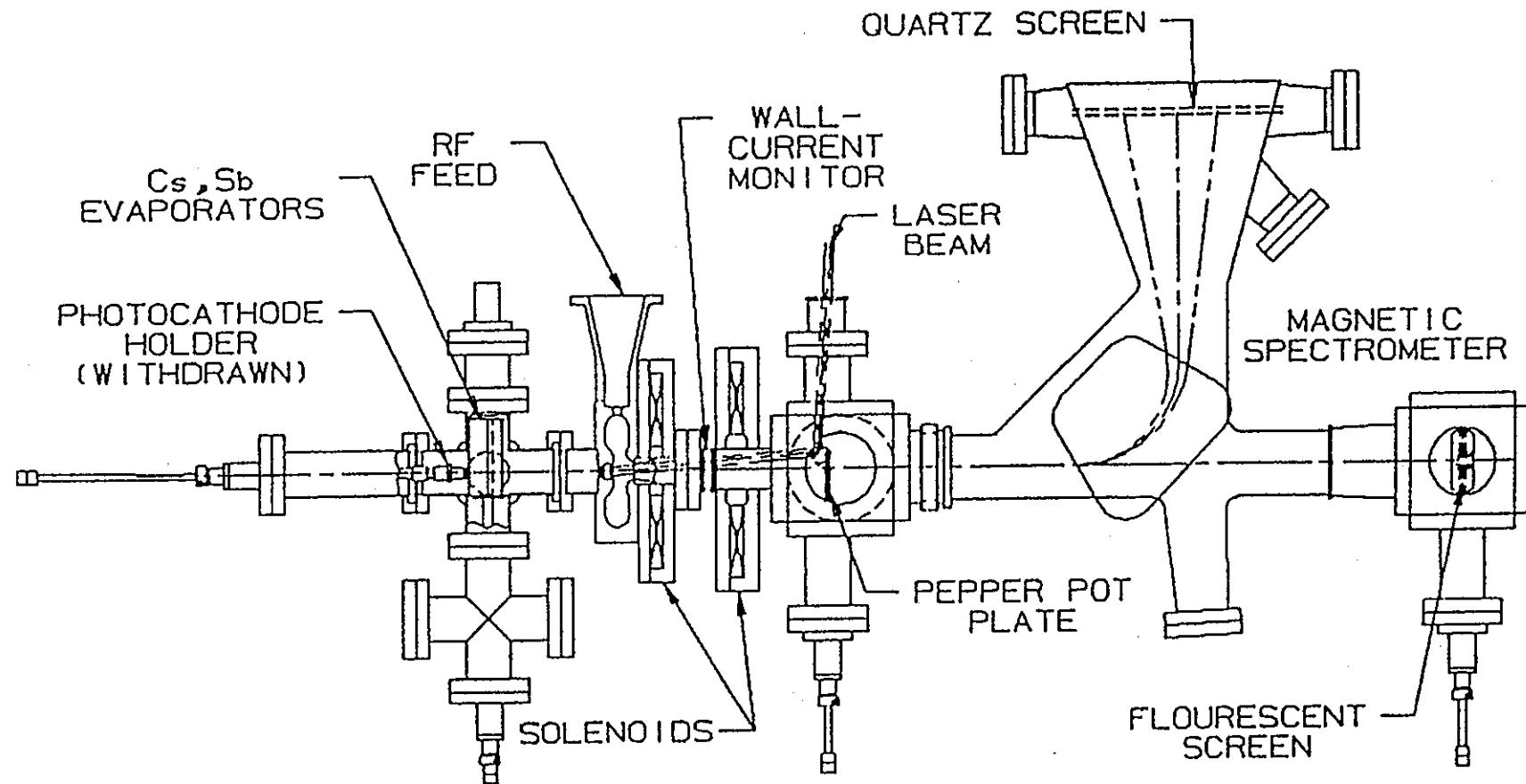
# Stanford Mark III



## Laser driven RF Gun

	Los Alamos (HIBAF)	Duke (FEL)
LASER WAVELENGTH [ nm ]	527	355
LASER MICROPULSE LENGTH [ ps ]	5 ~ 30	100
LASER MICROPULSE ENERGY [ $\mu$ J ]	4.6	40
CATHODE	<i>CsK2Sb</i>	<i>LaB6</i>
CATHODE AREA [ cm <sup>2</sup> ]	0.5	$7 \times 10^{-2}$
NUMBER OF CAVITIES	5 1/2	1
FREQUENCY [ MHz ]	1300	2857
MAX ON AXIS FIELD [ MV/m ]	26	50
MAX SURFACE FIELD [ MV/m ]	59.8	100
FIELD AT CATHODE [ MV/m ]	26	30
MACROPULSE LENGTH [ $\mu$ s ]	10 ~ 100	3 ~ 6
MACROPULSE FREQ. [ Hz ]	1	7.5
KINETIC ENERGY [ MeV ]	6	0.9
CHARGE [ nC ]	4	0.17
MICROPULSE LENGTH [ pS ]	15	2 ~ 3
MICROPULSE FREQ. [ MHz ]	21.67	95.2
PEAK CURRENT [ A ]	270	60 ~ 80
NORM. EMIT. [ $\pi$ mm mrad ]	35	8
RMS ENERGY SPREAD [ KeV ]	50	200
NORM. BRIGHT. [ $10^{10}$ A/m <sup>2</sup> rad <sup>2</sup> ]	4.47	50.7

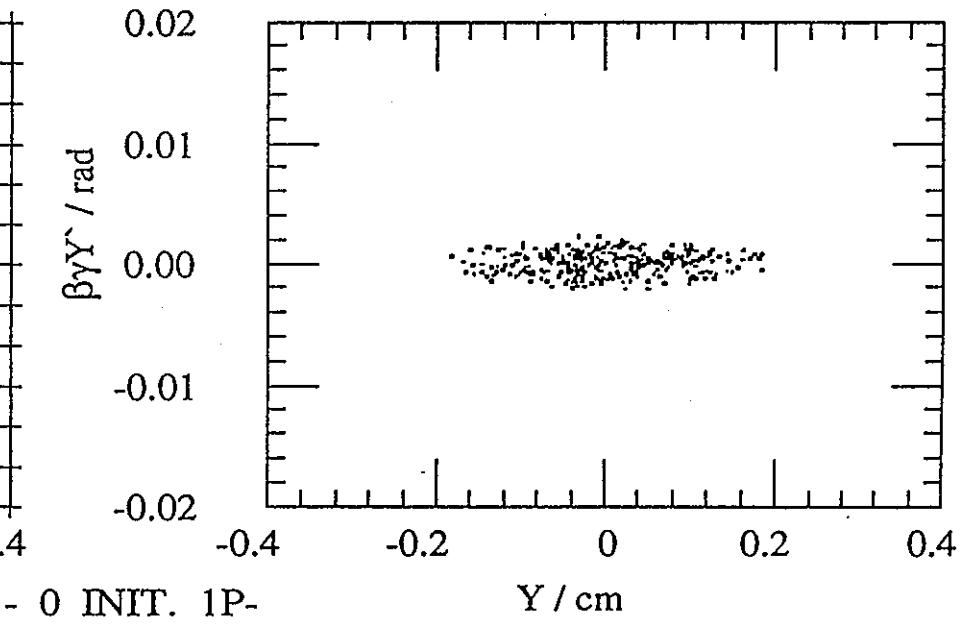
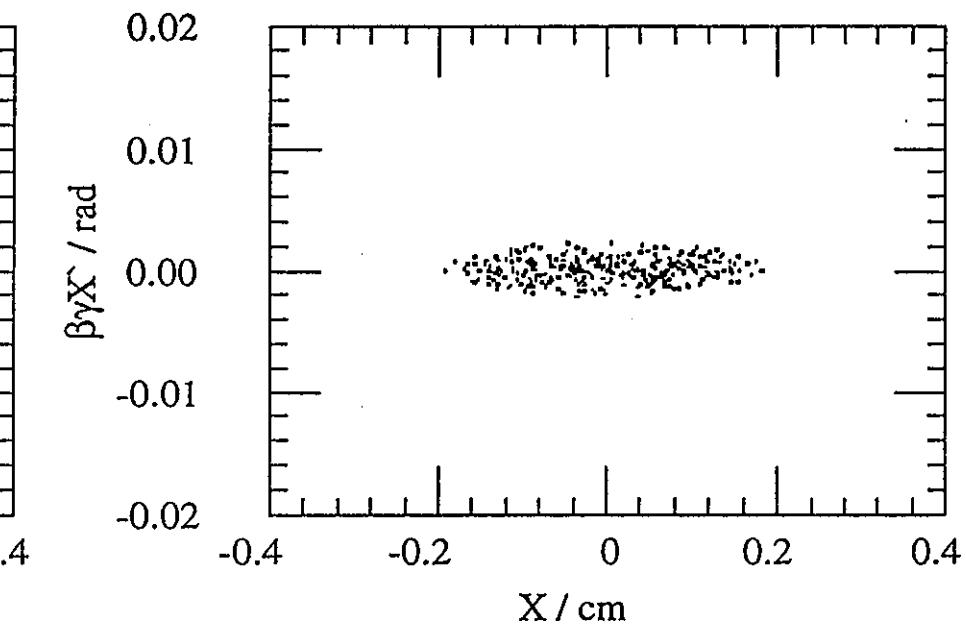
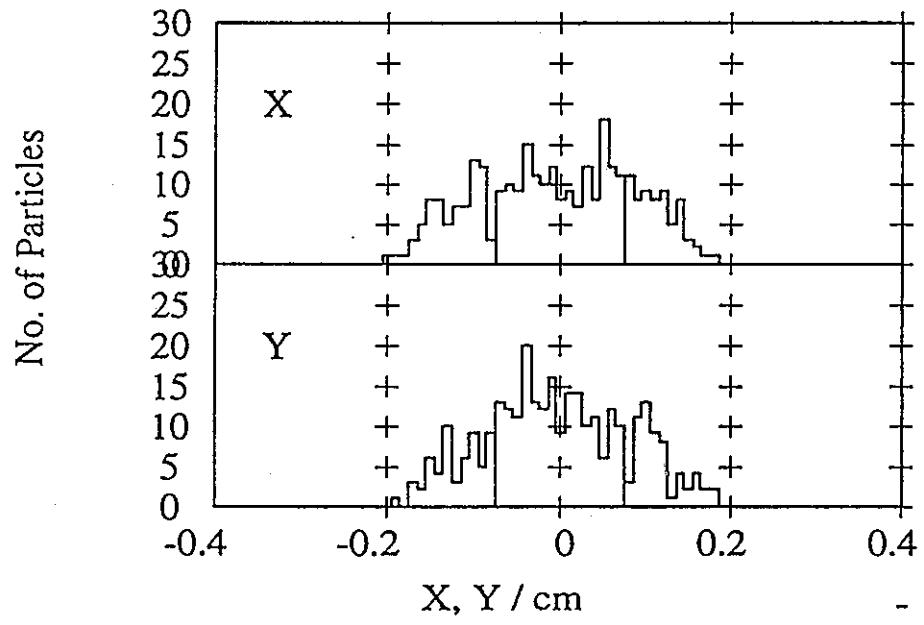
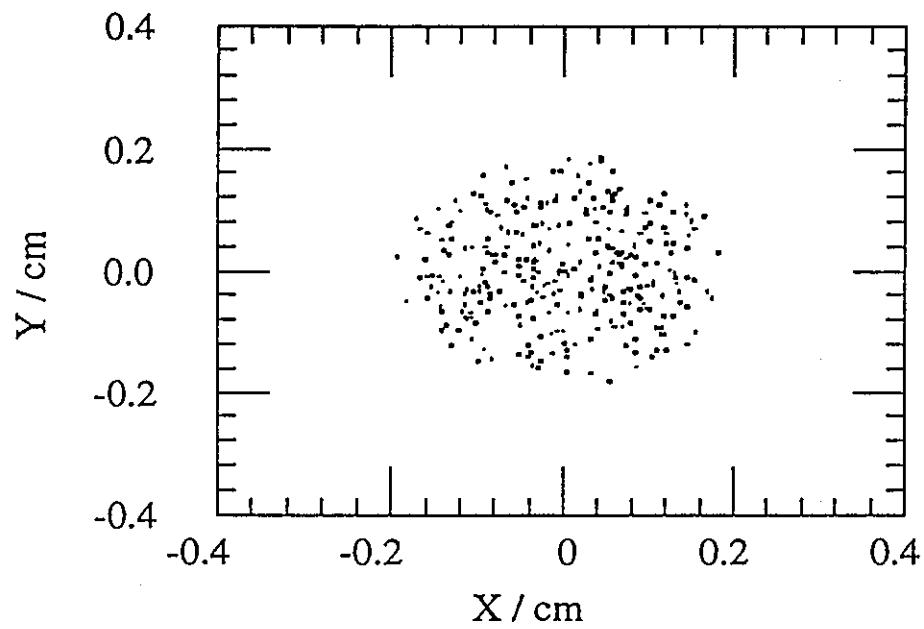
# THE LOS ALAMOS PHOTINJECTOR



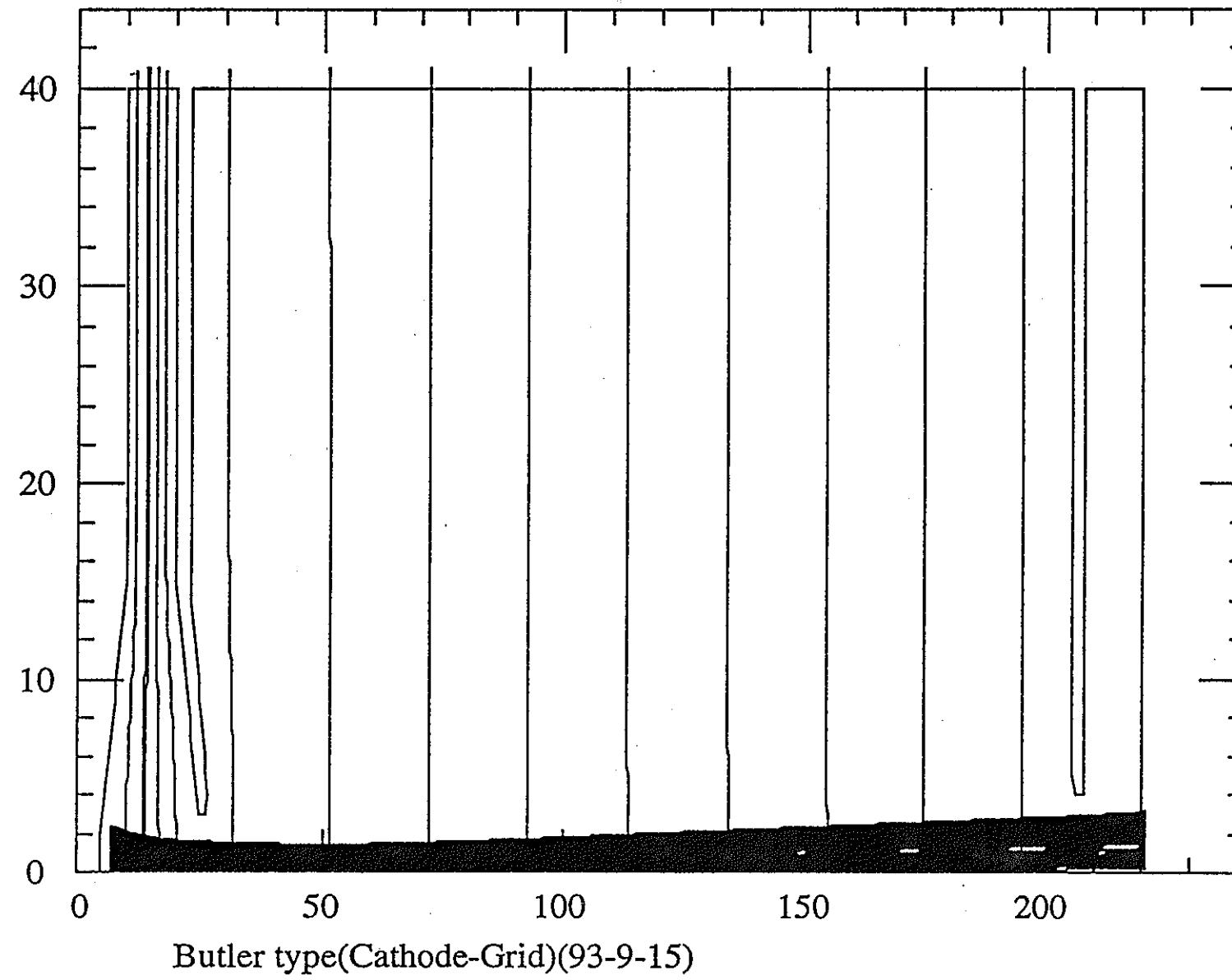
## 開発項目

(1) 電子軌道解析コード整備	電子軌道解析コードとして良く知られているPARMELAを改良しRF電子銃内での電子軌道解析を行う。
(2) RFキャビティーの設計	MAFIA等を用いてRF電子銃内での電場の解析を行い、最適形状の設計を行う。
(3) 最適なカソード材質及び形状の選定	テストベンチを製作し、カソードにレーザーを照射し、そこから放出される電子をDC電場で引き出す事により、カソードの寿命及び量子効率を測定し、カソードの材質及び形状の選定を行う。

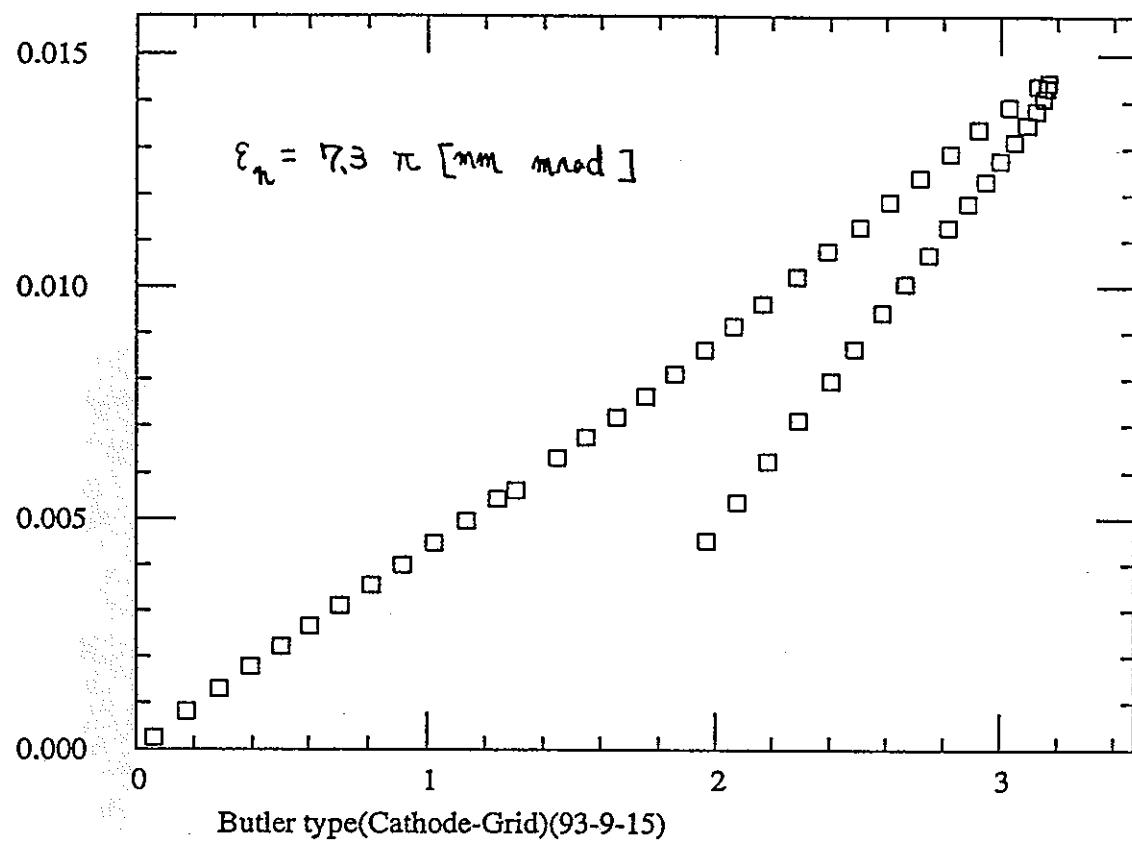
- 9 L -



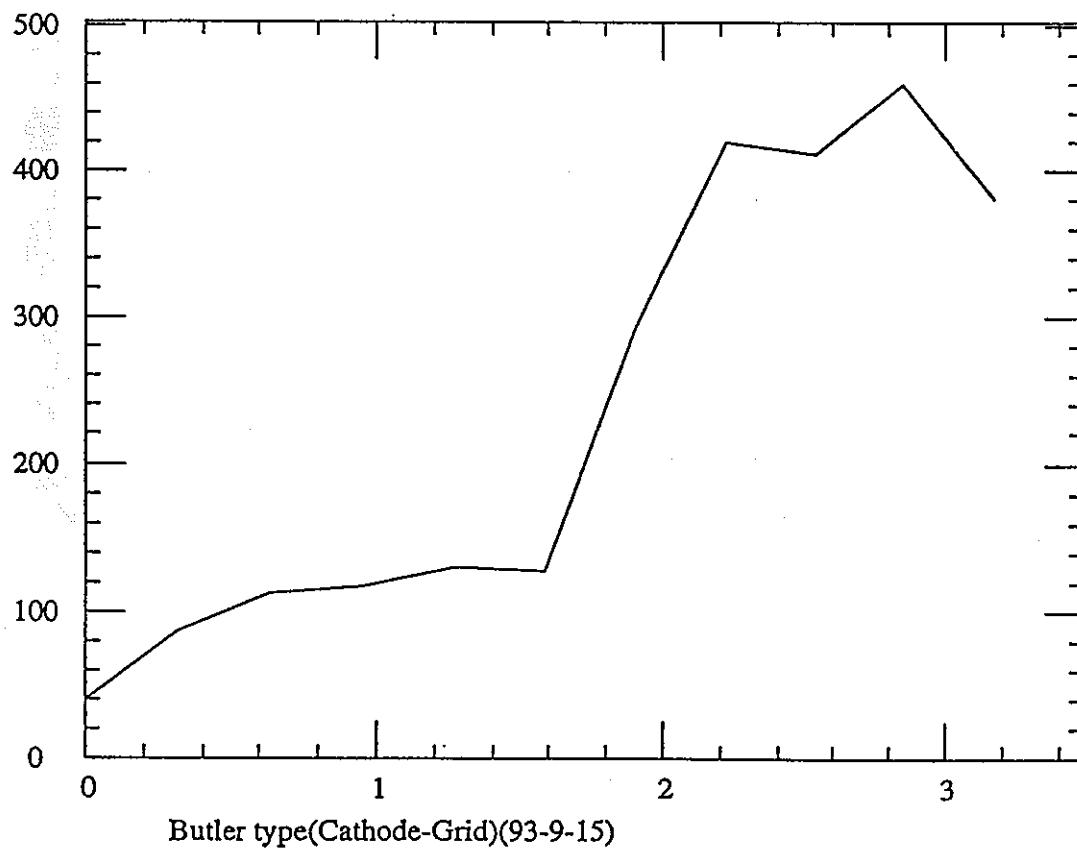
- 0 INIT. 1P-

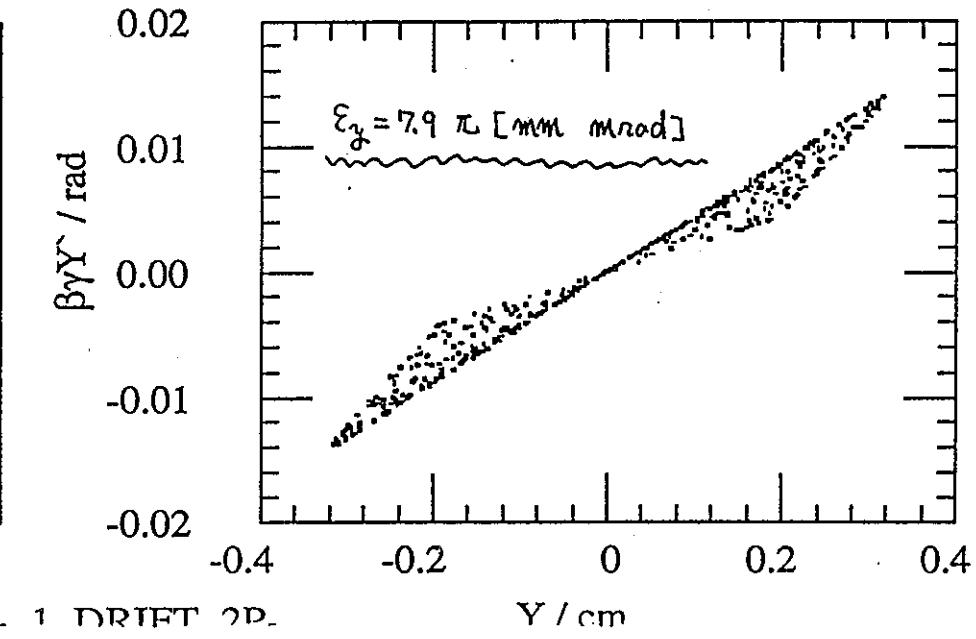
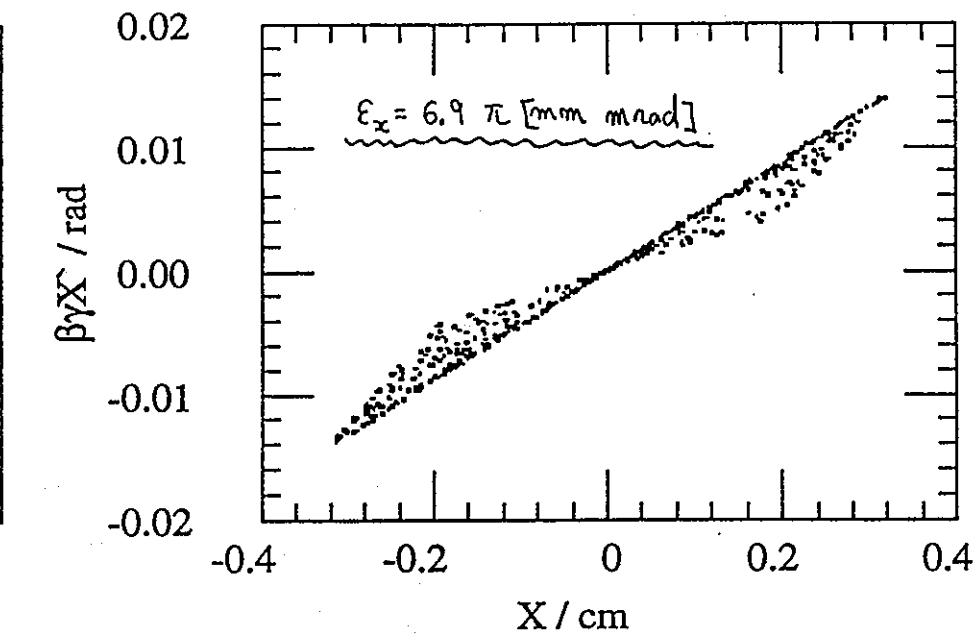
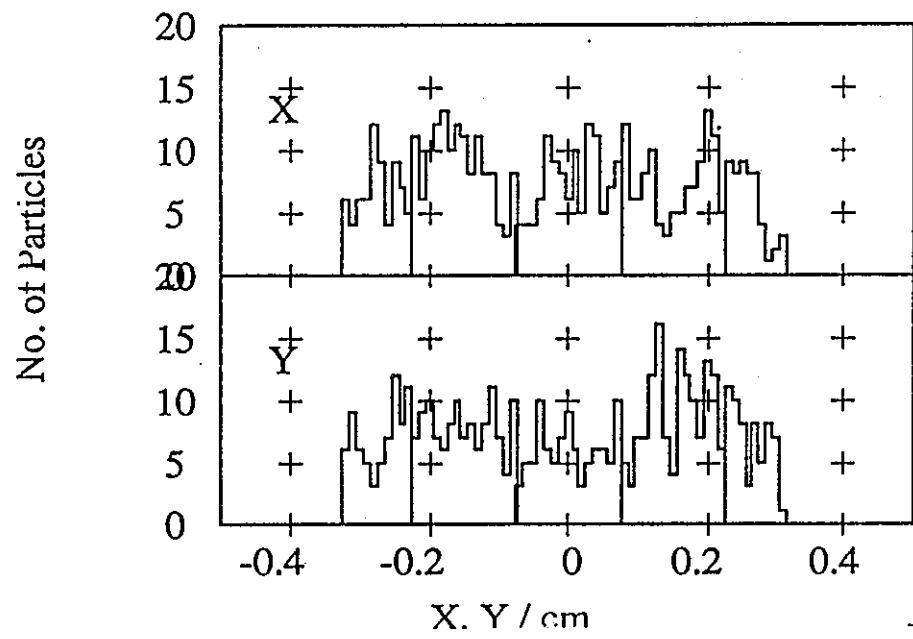
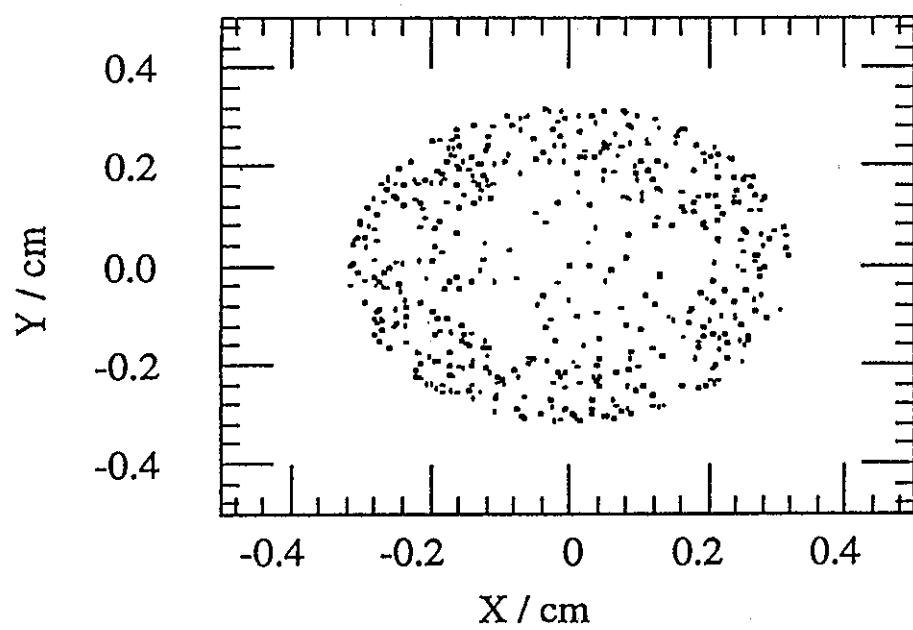


ALPHA VS R (MILLIRADIANS)



NORMALIZED CURRENT DENSITY





- 1 DRIFT 2D

# Los Alamos HIBAF rf gun

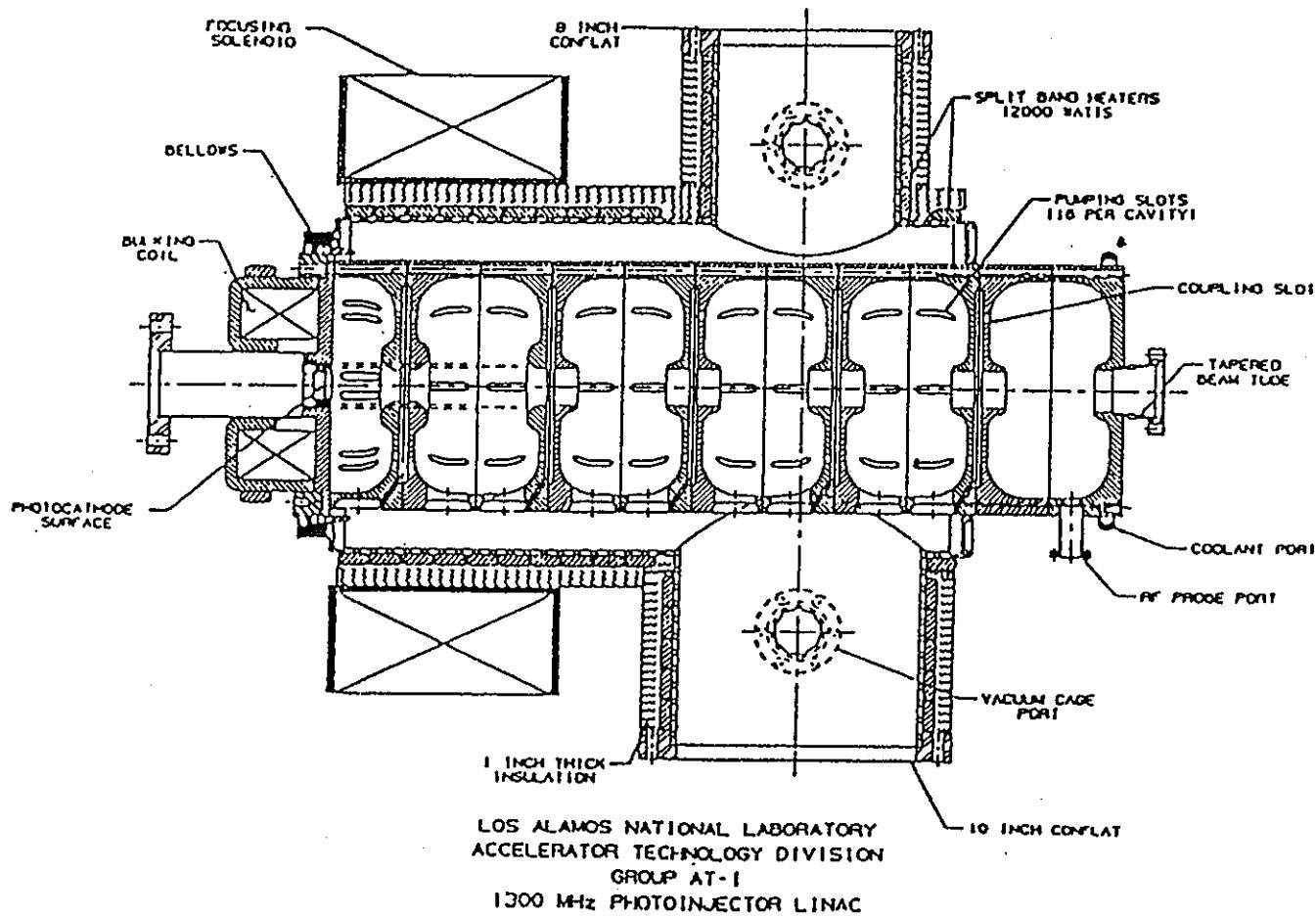


Fig. 4. Los Alamos HIBAF rf gun (from ref. [14]).

semiconductor cathodes	GaAs , CsK <sub>2</sub> Sb High quantum efficency ----> High current density (820A/cm <sup>2</sup> at LANL) Very good vacuum , short lifetime (Los Alamos , CsK <sub>2</sub> Sb , a few minutes to a few days)
metallic cathodes	Samarium , Yttrium Life time : metallic cathodes >> semiconductor cathodes Withstand high field Very good vacuum
single needle or array of needles cathodes	W , Nb <sub>3</sub> Ti , Carbon Unstable For high currents, these cathodes can be easily destroyed by thermal effects.
thermionic cathodes	LaB <sub>6</sub> , W , BaO , CaO LaB <sub>6</sub> ( Stanford ) , W , BaO , CaO (LAL Orsay ) Quantum efficency : semiconductor cathodes ~ thermionic cathodes >> metallic cathodes

# 電子銃テストベンチ概念設計

'93.10.21 山崎

## 〈電子銃パラメータ測定項目〉

### 〈カソード、電流、電圧特性〉

1. カソードヒーター特性(カソードヒーター電流 vs. カソード温度)
2. カソードエミッション特性(カソード温度 vs. カソードエミッション電流)
3. 引き出し電圧(グリッド印加電圧) vs. ビーム電流
4. カソード、アノード高電圧 vs. ビーム電流

### 〈ビームエネルギー、プロファイル、エミッタンス特性〉

5. ビームエネルギー分布
6. ビームプロファイル
7. ビームエミッタンス

### 〈収束レンズ特性〉

8. 収束レンズに流す電流と中心磁場の大きさ
9. 磁場強度 vs. ビーム焦点距離
10. レンズ収差

### 〈その他〉

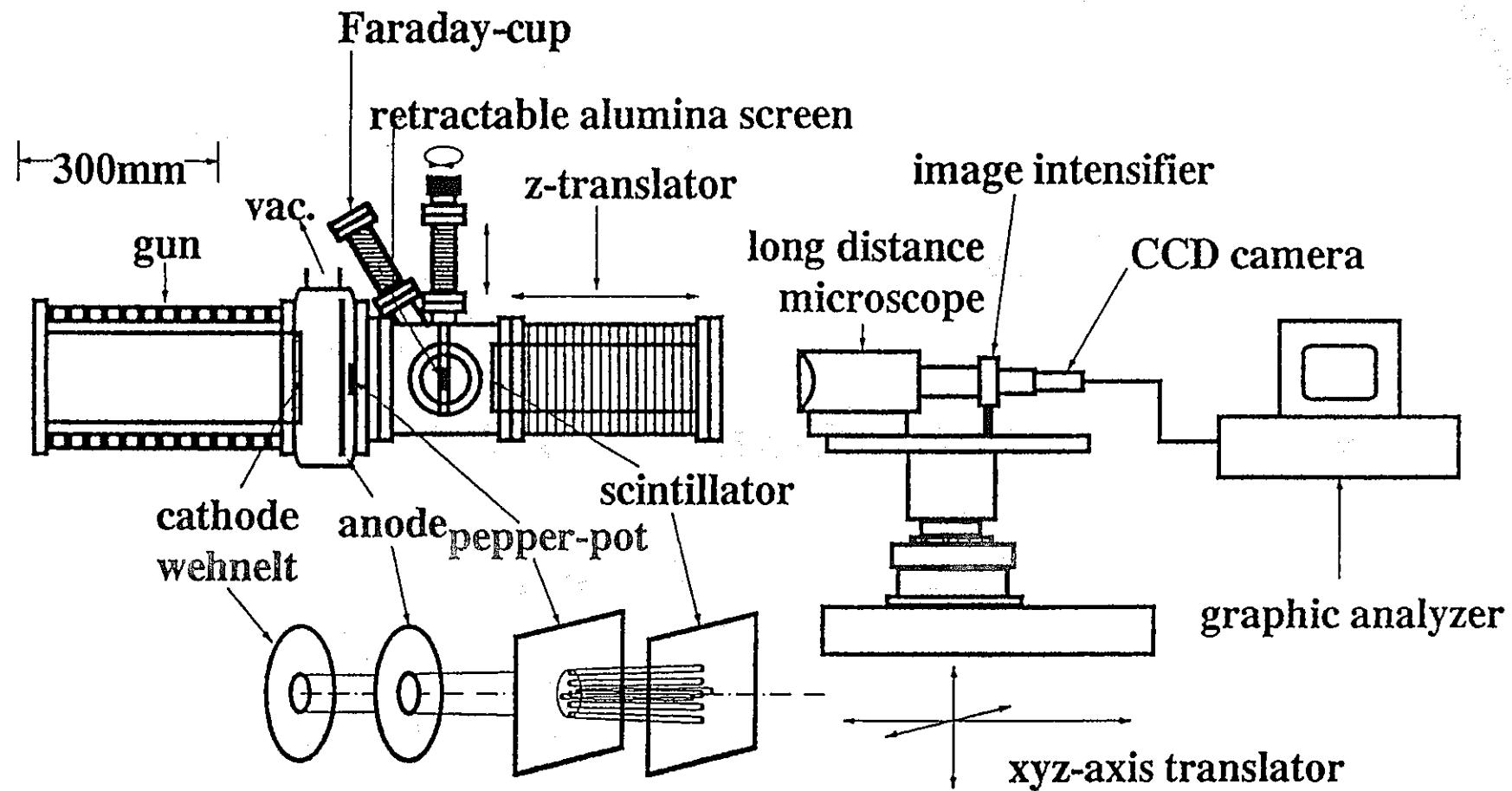
11. 真空度、残留ガス成分比
12. カソード寿命
13. カソード表面状態
14. 放電の有無

### 〈必要測定機器〉

1. カソード表面温度測定のためのビューポートおよびパイロメーター
2. ビーム電流値測定のためのコアモニターあるいはウォールカレントモニター
3. ビーム電流の絶対値測定のためのファラデーカップ
4. グリッドに流れる真電流測定のための電流計
5. ビームプロファイルを測定するための蛍光板、シンチレーター
6. プロファイル分析のための光学系、画像処理系
7. エネルギー分布測定のためのベンディングマグネットとチャンバー
8. ビームエミッタンス測定のためのマスク、スリット、およびコレクター
9. 真空ゲージ、Qマス

### 〈注意事項〉

1. 真空度を実際のビームラインなみに達成すること
2. できるだけコンパクトにするために多機能のチャンバーを導入すること
3. 可搬式の架台にすべて納まること
4. 電子銃本体およびその周辺機器は実際ビームラインに組み込むものと同じとする



《カソード材質(単結晶、多結晶)》

Al, W, LaB<sub>6</sub>, Bi

《エミッタンス、量子効率測定(DC、RF)》

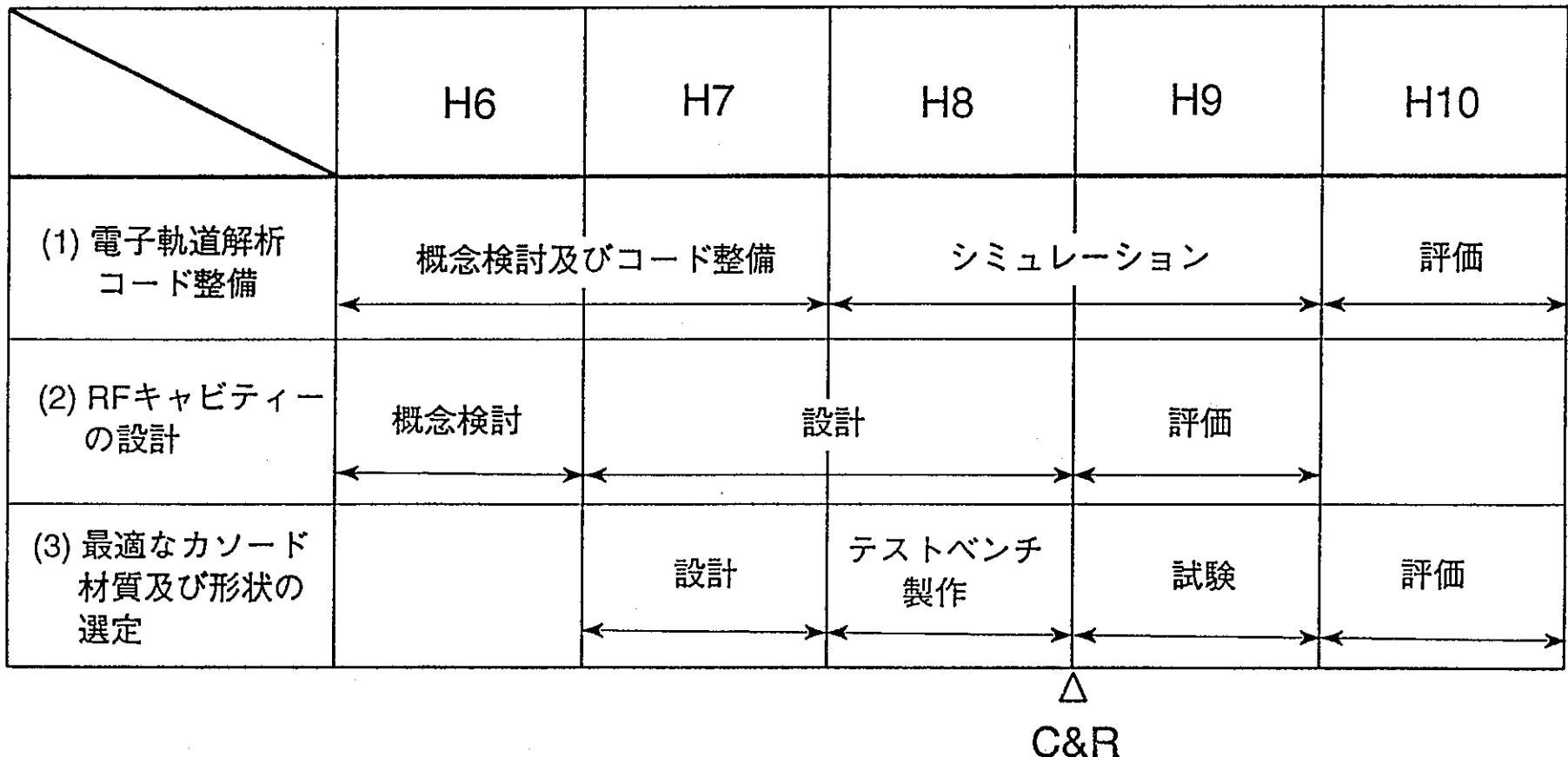
◎レーザー入射角  $\theta$ 、偏向面とカソードの作る角  $\phi$

$$J \propto I^n (\sin \theta \cdot \sin \phi)^{2n}$$

J: 電流      I: レーザー強度      n: 光子数

◎熱依存性

# 研究開発スケジュール



# 運転員の深い理解支援方策の研究

平成 6 年 1 月 14 日

動燃事業団大洗工学センター

技術開発部先進技術開発室

吉川 信治

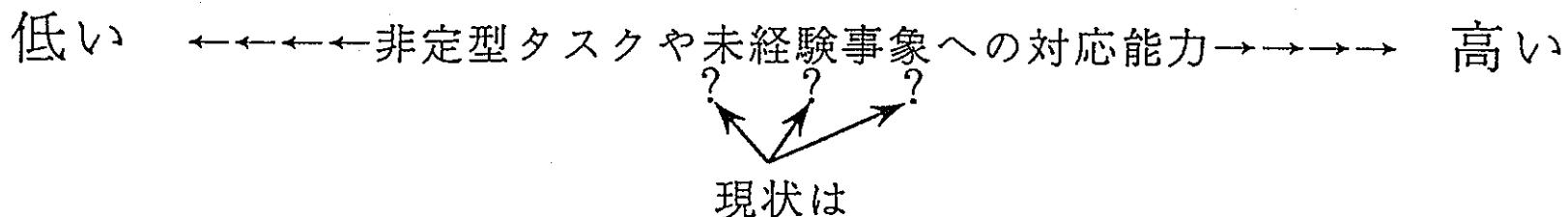
## 開発目標 『スキル』から『ナレッジ』への支援

スキルを深い理解により補完

スキル中心  
「この時はこうすれば良い」  
(マニュアルに書いてあった)  
(先輩に教わった)  
(シミュレータでうまくいった)  
個々の断片として記憶された知識

深い理解の進展

「…だからこうすれば良い」  
(この機器の特性は)  
(この部品の機能は)  
(この影響はここへ伝わる)  
関連付けられ体系化された知識



メンタルモデルの形成過程及び望ましいメンタルモデル像の追究

## 効果予測

非定型タスクや未経験事象への運転員の対応能力を効果的に向上させる方策

.....原子力のみならず、化学、製鉄等のプラント、交通システム等、大規模・複雑で社会的影響の大きな工学システム全般の安全性・信頼性の向上に貢献

# 事業団プロジェクト技術への反映

- ・確実で効果的な運転員・保守員教育

個々の人間の理解度に応じて最適な教示を行ない、理解の進展、誤った認識の修正を支援する方策

- ・プラント運転の信頼性・安全性向上
- ・故障時の迅速・確実な復旧

# 内外の現状レベル

知的CAD/CASEインターフェースへの認知科学的アプローチ（京大）

マンマシンシステムと人間信頼性（京大）

運転員の認知行動過程シミュレーション（東大）

運転員のチーム行動シミュレーション（電中研）

プラント運転員の共同作業形態の分析（日立製作所）

マンマシンインターフェースへの認知モデルの適用（三菱電機）

アラーム解析とプラント状態評価による故障仮説フィルタリング手法（米ORNL他）

# 内外の現状レベル

原子力分野での認知科学的研究：

生理心理指標

運転員の診断過程

人間-機械の役割分担

人間同志の共同作業

に関する研究

(モデル化、シミュレーション)

対象の機能構造、物理知識、工学的基礎知識に基づく運転員の  
プラントの挙動に対する理解（メンタルモデル）の形成を支援  
するための研究は少ない

# 動燃の関連技術の蓄積

常陽運転訓練シミュレータを用いた運転員の診断における思考過程のモデル化、システム化を通じて、

- ①運転員の思考モデル
  - ②運転員の思考事例をデータベース化するノウハウ
  - ③モデル化された思考過程を参照して診断システムを作成する技術
- が蓄えられている。

# 実施内容

## ① 現状の把握

メンタルモデル形成過程の分析法の開発

## ② メンタルモデル形成過程の分析

メンタルモデル形成過程のモデル化

## ③ 深い理解支援方策の策定

望ましいメンタルモデルのあり方の追究

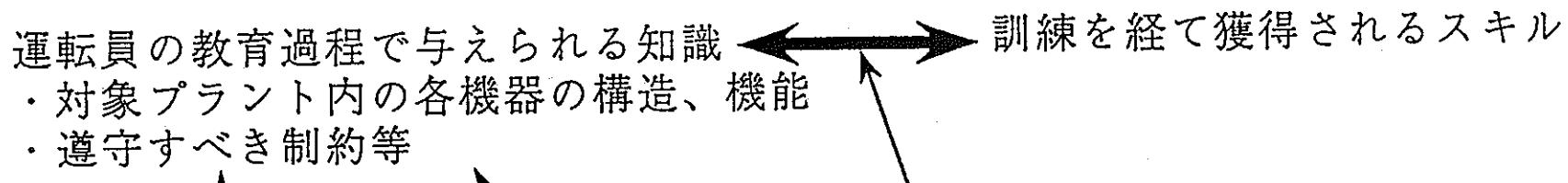
支援方策の策定

## ④ 深い理解支援システムの開発

システム開発

評価

## 実施内容①：現状の把握



認識

体系化

関連付け

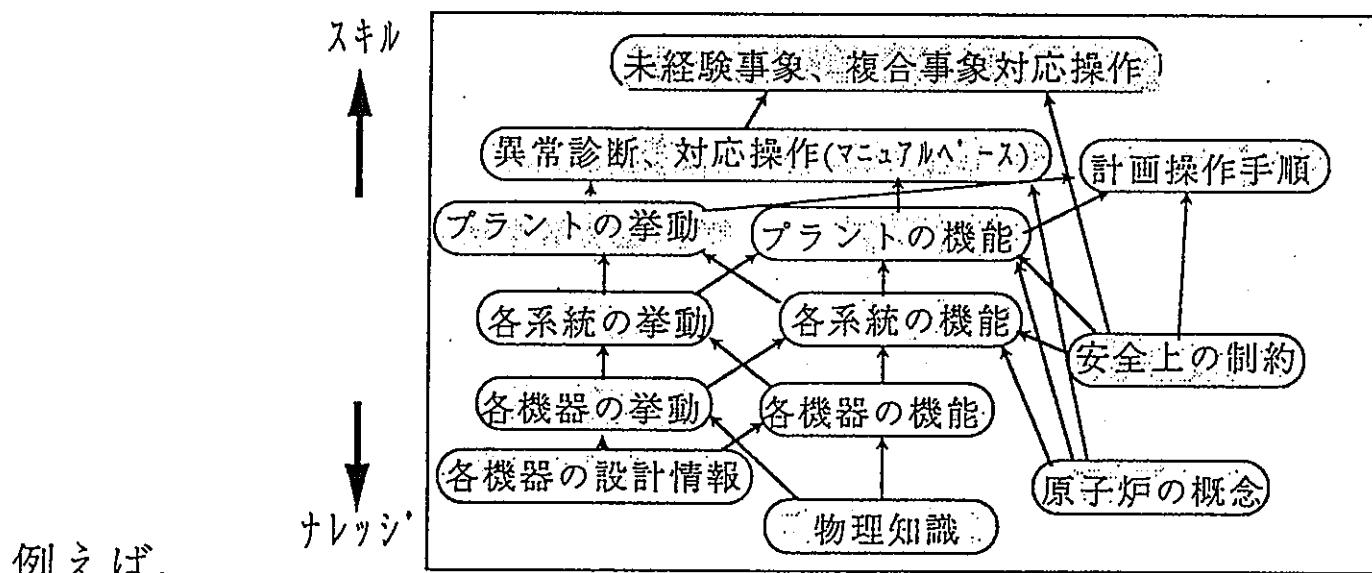
深い理解が必要な判断（質問に対する回答）、対応操作等の同定等、  
メンタルモデルの把握に利用できる調査事項を求める

メンタルモデル分析法の開発

実際にプラント運転に従事している運転員のメンタルモデルを分析する。

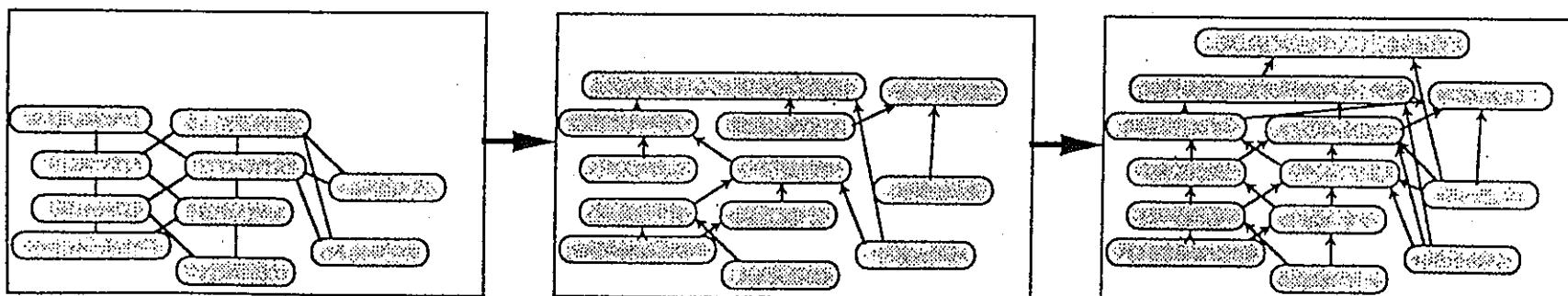
どの程度？

## 実施内容②：メンタルモデル形成過程の分析



例えば、

メンタルモデル構成要素を、設計情報や一般的物理知識(ナレッジ)に近いか、経験的診断知識や操作手順(スキル)に近いかで区分し、それらの構成要素の蓄積と、構成要素間の連携や構造の発達の2点でメンタルモデル形成過程を定式化する



## 実施内容③：深い理解支援方策の策定

### a) 望ましいメンタルモデルのあり方の追究

可能な研究手法の1例：

望ましいメンタルモデルのパフォーマンスの指標として、例題を設定する。

異常時対応マニュアルのみでは対処不可能な事象  
例：複数の機器の故障、インターロック故障、等

例題への対処が可能になるための、必要な知識要素、および知識要素間の連携を同定し、分析したメンタルモデル形成過程の延長上に望ましいメンタルモデル像を想定する

### 実施内容③：深い理解支援方策の策定

#### b) 支援方策の策定

望ましい理解進展過程の定式化

支援方策を見いだす：以下の処理を行なう手法の開発  
【現時点のメンタルモデル】



【標準過程中のどの段階に相当するか】



【次に進展すべき理解事項は？】



【その進展をもたらすものは？】

## 実施内容④：深い理解支援システムの開発

### a) システム開発

③の手法を具体的にソフトウェアとして製作

### b) 評価（実験炉運転部署の協力による）

システムの教示内容が、運転員の指導経験から見て妥当で現実味があるか

新人運転員にとって理解容易なインターフェースが達成されているか

理解の進展に必要な試行錯誤を阻害するような副作用はないか

# 他の部署、他機関との協力

## 実験炉部の協力の必要性

- ・メンタルモデル形成過程の事例収集
- ・開発した手法、システムの妥当性、現実性の評価

メンタルモデル形成過程の事例収集に大きなマンパワーが必要  
実プラントにおける運転経験が必要

## 認知科学研究機関との共同研究の必要性

- ・人間が新たな対象に対するメンタルモデルを形成する過程に関する一般的知見
- ・研究遂行上のノウハウ

メンタルモデル形成過程の事例収集の際、運転員が観測／記録されているという意識が挙動や回答等の採取データに影響しないための技術が必要

# 研究開発スケジュール（予算・人員計画）

年度		平成 6	平成 7	平成 8	平成 9	平成 10
項目	1 現状の把握	■				
	2 メンタルモデル 形成過程の分析		■	■		
	3 深い理解支援方策 の策定			■	■	
	4 深い理解支援シス テムの開発・評価				■	■
人員	動燃職員(人・年)	1	2	2	2	2
	客員研究員等(人・年)	1	2	2	2	2
予算	(百万円)	10	20	20	30	30

# 計算科学的手法による流体一構造系の 統合シミュレーションの研究

-201-

大洗工学センター  
安全工学部原子炉工学室

フロンティア研究計画

# 研究目的

- 热流体力学や構造力学、中性子工学の支配方程式で記述される現象が相互作用した複合事象を統合的にかつ高精度に解析する手法を確立する。

→ 計算炉の安全設計

# 高速炉における複合事象

構造力学



熱流体力学



中性子工学

冷却材バウンダリ

内部  
構造物

冷却材



熱の流れ

炉心

# 達成目標

- 大規模数値シミュレーション手法の開発
  - ・ 超並列計算機等の活用
  - ・ 物理現象モデルや解析アルゴリズムの開発
  - ・ 複合事象を統合的にかつ高精度に解析する
    - 高速炉の複雑な境界条件下
    - 熱流や構造、中性子の相互作用
- 大規模実験を計算科学的手法により代替
  - ・ 高速炉の高性能化と安全性向上

# 研究項目

- 流体一構造相互作用シミュレーション
  - 熱的な流体一構造相互作用
  - 機械的流体一構造相互作用
- 複雑形状空間における熱流動シミュレーション
  - 燃料集合体熱流動
  - 原子炉容器内熱流動
- スーパーシステムシミュレーション
  - 核一熱流動一構造の相互作用
- 数値解法アルゴリズムの開発
- 複雑現象のコンピュータグラフィックス

# 研究スケジュール

No	項目	当該評価対象期間					
		右以前	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10
(1)	流体一構造相互作用	●調査	●手法の —手 法の	●開 発	●検 証	●適用性 評価	
(2)	複雑形状空間における熱流動	●調査	●調査	●—手 法の	●開 発	●検証	
(3)	核熱流動を統合したスパ。システム		●調査	●開 発	(I) ●— 検証(I)		
(4)	数値解法アルゴリズム コンピュータグラフィックス		●調査	●アルゴリズム 開 発	●調査	●コンピュータ グラフィックス 開 発	

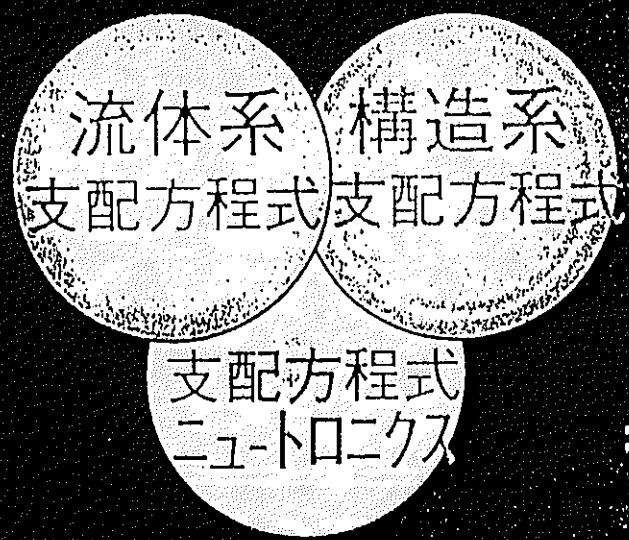
# 研究の背景

- コンピュータ性能のブレークスルー
- ベクトルコンピュータ
- ベクトルパラレルコンピュータ
- 並列コンピュータ
- 超並列コンピュータ
- ハイブリッドスーパーコンピュータ

# 工学問題へのアプローチ(1)

理論的アプローチと実験的アプローチ

## 複合事象



複合事象 → 素事象に分離できない

# 工学問題へのアプローチ(2)

## 工学的モデルに基づく数値解析

- 工学的モデルの作成
- 基礎実験による検証
- モデルパラメータの決定

### 利点

計算機の性能に照らし  
あわせて現実的な解析  
が可能である

### 欠点

個々の問題毎にこのス  
テップが必要であり、  
汎用的、普遍的でない

- → 問題固有のアプローチである

# 数値解析の動向（熱流体分野）

- |            |            |
|------------|------------|
| ○ 二次元解析から  | 三次元解析へ     |
| ○ 定常解析から   | 非定常解析へ     |
| ○ 単一事象から   | 複合事象へ      |
| ○ 単純化モデルから | 現象に忠実なモデルへ |
| ○ 決定論的解析から | 統計論的解析へ    |

(第6回計算力学講演会、河村より)

# 計算科学的手法による アプローチ(1)

- ・大型試験から数値実験へ
- ・理想的な計測が可能
- ・場を乱さない
- ・任意の場所で任意の物理量
- ・測定量の演算

# 計算科学的手法による アプローチ(2)

- 大型試験の代替
- 試験の実施コスト
- マンパワー
- 期間

# 計算科学的手法による アプローチ(3)

- 大型試験の支援
  - 試験計画立案
  - 試験結果の解釈
  - 工学的モデルの検証
- 条件を変えた仮想実験

# まとめ

## 計算科学的手法による流体一構造系の 統合的シミュレーションの研究

- 複合事象の解明
  - 工学的モデルの限界を打破
  - 計算科学による最適設計
  - 理想的な実験条件を実現
- 高速炉の高性能化と安全性向上

平成6年1月10日  
第2期フロンティア研究事前評価  
評価作業部会用資料

# 繰返し有限要素法解析を用いた 構造物非線形挙動の体系的評価法の開発

動燃大洗工学センター  
機器構造開発部  
構造工作室

## 開発目標

手段 : 有限要素法 (FEM) シミュレーション解析繰返し等

### 目標① [基軸]

: 構造物の挙動とその形状及び負荷との関係を簡明に表す関係式の策定

挙動 : 変形及び局部応力ひずみ挙動

負荷 : 機械荷重 (内圧・自重・地震力・配管反力等)

{ 冷却材 (流体) 温度変化

関係式 : 弾性 (熱応力) 挙動 / 非弾性挙動

### 目標② [新技術]

(a) : 強度支配因子統計的傾向の定量的評価

(b) : 知的推論に基づく簡易応力評価法

## 効果予測

### (1) 設計等の作業における試行錯誤の回数・量の大幅な軽減

原子力機器の構造健全性評価 ⇔ 設計・製作・運転・保守・補修等

..... 「応力解析」に基づく評価

有限要素法（F E M）解析.....任意条件での解が取得可能な数値実験

条件の変更・最適化に必要なパラメータサーベイ…膨大な回数・量の試行錯誤

簡易法の開発 ⇒ 試行錯誤の回数・量の大幅な軽減

### (2) 基本特性の把握に基づく合理的な解の導出

限られた条件での解の取得.....表面的現象理解.....「追認型強度評価」

簡易法による現象把握.....本質的現象把握.....「創造的強度評価」

⇒ 応力挙動把握に基づく合理的設計・製作・運転・保守・補修

### (3) 一般産業用機器への展開

建設費低減・日負荷追従運転・寿命延長・保守／補修法改善

“Design by Formula” ⇒ “Design by Analysis”

## 国内外の技術レベル(1/3)

### (1) 従来の簡易応力評価法

[弾性解]

シェル解等 ASME B&PV Code Sec. III Appendix A STRESS ANALYSIS METHOD

A-2000 円筒 A-6000 不連続応力（シェル接続）

A-3000 球殻 A-7000 熱応力

A-4000 皿形／橢円鏡 A-8000 管板

A-5000 平鏡 A-9000 Interaction Method

配管方程式用応力指数

ASME B&PV Code Sec. III NB-3600

(告示 501号第48条)

光弹性解等の集大成

Peterson 等

[疲労（クリープ疲労）強度評価用

非弾性挙動補正]

Ke係数

A係数

Neuber則

弾性追従モデル

[課題]

適用範囲

形状制限

溶接部強度

過渡熱応力

安全裕度の適正化

## 国内外の技術レベル(2/3)

### (2)確率論的強度評価法

強度支配因子：

- { 材料特性（物理的特性・挙動特性・強度特性）…○
- 形状（形状公差・as-welded 形状）…………△
- 負荷（機械荷重／冷却材温度変化）…………×

設計係数……工学的判断 ⇒ 確率論的裏付け

- { 設計引張り強さ・設計降伏点      95/99%LCL
- 耐震座屈強度                        95%LCL
- 新規設計基準概念  
  破壊力学的評価の併用⇒破損様式に対応した設計係数

## 国内外の技術レベル(3/3)

### (3) 知的推論に基づく簡易応力評価法

有限要素法の特徴を活かした効率的定式化法

有限要素法パラメータサーベイ……膨大な作業量／試行錯誤数……要工夫

マンマシンインタフェイスの改善……CAE……商業ベースで実用化途上

CAD  $\Rightarrow$  FEM解析  $\Rightarrow$  CAD  $\Rightarrow$  データベース  $\Rightarrow$  定式化



パラメータ設定法・回帰手法

### 定式化限界への挑戦

過渡熱応力 $\Leftrightarrow$ 構造不連続部過渡温度応答……理論解取得性？

Synthetic Approach

- { ハイブリッド概念： PC活用・簡易FEM
- 知識ベース： シェル解・光弾性解・類似解……方法論
- ニューラルネットワーク： 任意非線形解……………解の有効性・信頼性

## 事前評価前の進歩状況(1/5)

### (1) ETD委員会

高圧力技術協会／JPVRC設計部会下 平成4年6月発足

目的 "Design by Analysis"による一般産業用高温構造設計基準の策定  
米国PVRC/C-ETDとの情報交換

親委員会（朝田委員長・永田副委員長）

中立研究機関等（東大・KHK・電中研・金材技研・動燃）  
電力（東電・原電）  
重機（三菱重工・日立・東芝・IHI・川重）  
化学（日揮・東洋エンジニアリング・日鉱共石・千代田化工・日石エンジニアリング）  
材料（新日鐵・日本製鋼・住金・神鋼・川鉄・NKK）  
解析手法分科会 主査：佐藤（日揮）・福田（日立）  
基準化分科会 主査：植田（原電）・和田（三菱）  
材料強度基準分科会 主査：田原（日本製鋼）

解析手法分科会によるアンケート調査

「応力分布の簡易評価に関するアンケート調査」

平成5年11月末配布⇒ETD委員会・TDF委員会

平成5年度内に簡易評価法を必要とする対象構造・負荷条件絞込み

## 事前評価の進捗状況(2/5)

### (2)機械学会

平成5年10月27日中嶋事業課長と面談

狙い：「研究協力部会」下での分科会設置による簡易法開発組織化

結果：〔参加分担金 $\geq$ 委託金〕が分科会継続条件

⇒国内活動組織化は高圧力技術協会ETD委員会を活用

## 事前評価の進歩状況(3/5)

### (3)米国PVRC

-DESIGN DIVISION	Kroenke
C. on BOLTED FLANGE CONNECTION	Hsu
C. on DYNAMIC ANALYSIS AND TESTING	Bitner
C. on ELEVATED TEMPERATURE DESIGN	Dhalla
C. on PIPING AND NOZZLES	Moore
C. on POLYMERS FOR PRESSURE COMPONENTS	Leon
C. on SHELLS AND LIGAMENTS	Hollinger
-MATERIALS AND FABRICATION DIVISION	Imgram
C. on FAILURE MODES OF COMPONENTS	
C. on NDE OF PRESSURE COMPONENTS	
C. on THERMAL AND MECHANICAL EFFECTS ON MATERIALS	
C. on WELD METALS AND WELDING PROCEDURES	
C. on THE REVIEW OF PIPING	
STEERING COMMITTEE ON CYCLIC LIFE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS IN NUCLEAR APPLICATIONS	
平成5年11月8日Dr. Prager(Executive Director)と打合せ ⇒PVRCへの委託の可能性の把握	

## 事前評価の進歩状況(4/5)

Dr. Dhalla からの提案

- 1) Prediction of Inelastic Stresses and Strains by Iterative Elastic Analysis by J. M. Corum & R. C. Gwaltney(ORNL)
- 2) Simplified Creep-Fatigue Life Prediction Rule by S. Majumdar(ANL)
- 3) Simplified Relaxation Locus Method for Elevated Temperature Design by D. L. Marriott(SESI)
- 4) Simplified Ratcheting Analysis for Bending Problems by S. Majumdar(ANL)
- 5) Evaluation of Creep-Fatigue Damage Rules by J. J. Blass(ORNL)
- 6) Mode Approximation Method for Dynamic Plastic Deformation of Strain Hardening Structures by C. K. Youngdahl(ANL)
- 7) Flaw Assessment Procedure for Welded Components Subjected to Creep-Fatigue Loading by M. Ruggles(ORNL)
- 8) Simplified Strain Concentration Factors in Creep Range by H. Ziada(W-Hanford)

## 事前評価前の進歩状況(5/5)

### (4)弾性過渡熱応力に関する新簡易応力評価法

"Thermal Transient Stresses at Structural Discontinuities"

T. Nagata, Post SMIRT Seminar in Julich, Aug., 1993

{ 非線形温度応答……一次元熱伝導ルーチン  
  { シェル解+弾性応力集中係数K  
    基本構造不連続部への適用性の確認

## 計画実施内容

### (1) [基軸] 簡易評価法開発

弹性・非弾性FEMパラメータ解析結果の回帰分析による簡易式の導出

{ 対象： 平成5年度ETD委員会活動成果を活用

設計基準化のための簡易法開発

「解析による設計」の一般化を目指す国内外活動を組織化

①国内 高圧力技術協会ETD委員会

②国外 米国PVRC/C-ETD委員会

-226-

### (2) [新技術] (a)確率論的強度評価法

(b)知的推論に基づく簡易応力評価法

内部実施によるfeasibility study ⇒ 発展性・実用性に応じた展開

### (3) 予算

初年度(平成6年度) 約42百万円

2年度目以降 約60百万円

## クロスオーバ研究体制(1/2)

### [標題]

原子力用構造物の巨視的／微視的損傷の計算力学的解析法の開発とその応用

### [目的]

微視的及び巨視的観点による原子力用機器等の劣化・損傷機構の解明とその予測のための新しい計算力学的手法の開発

### [方法]

最新計算技術環境下での計算材料科学的手法及び計算力学的手法の活用

### [留意点]

実施4機関及び国内・国外の関連機関の活動の有機的連繋  
各機関が独自に培ってきた技術の相互有効活用

## クロスオーバ研究体制(2/2)

### 各 機 関 実 施 内 容

#### 動力炉・核燃料開発事業団

繰返し有限要素法解析を用いた構造物非線形挙動の体系的評価法の開発

#### 日本原子力研究所

構造用脆性材料の微視的構造力学及び確率論を用いた損傷評価法の開発

#### 理化学研究所

原子力用構造物破壊強度の加工・熱履歴を考慮したシミュレーション技法の開発

#### 金属材料技術研究所

原子力用材料の微視組織を考慮した計算力学的解析法及び組織構成最適設計法の開発

平成5年12月8日  
ETD委員会解析手法分科会

93 ETD-A-3-3

応力分布の簡易評価に関するアンケート集計結果

ETD委員会解析手法分科会

ETD委員会解析手法分科会では、応力分布を簡易的に評価する手法の基礎データとして、各社及び各研究機関のニーズ、要望についてアンケートをとった。以下の会社、機関から回答があった。

原電、神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮  
回答結果をまとめると次のとおりとなる。

1. 応力の簡易評価を必要とする構造あるいは部位およびそこで評価すべき損傷形態としてどのようなものがありますか。

## (A) 圧力容器一般

- (1) ノズル取付部 (川重、IHI、千代田化工、TEC、日揮) 疲労、クリープ
- (2) スカート取付部 (IHI、千代田化工、日揮) 疲労、クリープ、座屈
- (3) サドル取付部 (日揮) クリープ
- (4) ラグ、リング類の取付部 (川重、日揮) 疲労、クリープ
- (5) フランジ付き円筒胴 (東芝) 疲労、クリープ
- (6) 热的ホットスポット (川重) 疲労、クリープ
- (7) 壁内温度分布 (胴、配管) (川重) 疲労、クリープ

## (B) 热交換器

- (1) 管板 (管板一胴取付部) (原電、千代田化工、TEC) 疲労、クリープ
- (2) 管板 (孔まわり) (原電、TEC) 疲労、クリープ
- (3) 伝熱管 (IHI) クリープ

## (C) 配管

- (1) 配管 (IHI) 疲労、クリープ
- (2) 配管エルボ (原電) 疲労、クリープ、ラチエット
- (3) Yピース部 (原電、東芝) 疲労、クリープ
- (4) ベローズ (川重) 疲労、クリープ

## (D) その他

- (1) 管台部 (原電) 热座屈
- (2) 加熱管 (日揮) 疲労、クリープ
- (3) リブ構造 (原電) 疲労、クリープ
- (4) 異材継手の热応力 (TEC) 疲労、クリープ
- (5) すみ肉溶接 (川重) 疲労、クリープ
- (6) 弁 (川重) 疲労、クリープ
- (7) ホット／コールドウォール遷移部 (TEC) クリープ
- (8) サイクロン型ノズル (千代田化工) クリープ
- (9) 燃料電池用改質器ハーフトラス部 (神鋼) 疲労、クリープ

2. 解析の種類として、どのようなものが必要になりますか。

- 定常温度分布解析・・・(神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)
- 非定常温度分布解析・・・(原電、川重、IHI、東芝、千代田化工、日揮)
- 弾性応力解析・・・・(神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)
- 非弾性応力解析・・・・(原電、神鋼、IHI、東芝、千代田化工、TEC)

簡易非弾性という意味で(原電)

□その他(座屈、振動数、き裂進展)・・・(川重)

3. 荷重条件あるいは境界条件はどのようなものですか。

(必要に応じ、簡単なスケッチを添えてください)。

- (1) 内圧・・・・・・・(神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)
- (2) 配管反力(ノズル)、端部機械的荷重・・・(川重、IHI、千代田化工、日揮)
- (3) 自重、転倒モーメント(風、地震)・・・・(神鋼、東芝、日揮)
- (4) 地震力・・・・・・・・・・・・(IHI)
- (5) 温度分布・・・(原電、神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)  
(定状／非定状)

ナトリウムの熱過渡(原電)

4. 解析面から見て、構造上あるいは荷重条件などにどんな特徴がありますか。

(非一体型構造、不完全溶け込み溶接、3次元構造、構造不連続部の近接、時間とともに荷重(内部流体温度)が急変など)

- (1) 3次元構造の簡易化(2次元モデル化)・・・(川重、千代田化工、日揮)
- (2) 非定常温度分布による熱応力・・・(原電、東芝、千代田化工、TEC、日揮)
- (3) すみ肉溶接構造の疲労あるいはクリープ疲労問題・・・(日揮)
- (4) 負荷変動、シャットダウン回数多い・・・・・・・(神鋼)
- (5) 構造不連続部の近接・・・・・・・・・・・・(千代田化工)

5. 用いる材料はどのようなものですか。

- (1) 炭素鋼・・・・(TEC)
- (1) 低合金鋼・・・・(原電、川重、IHI、千代田化工、TEC、日揮)
- (2) ステンレス鋼・・・(原電、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)
- (3) HP材等・・・・(神鋼、日揮)

6. どのような応力評価が必要となりますか。

■1次および2次応力評価

・・・(原電、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)

■ピーク応力評価(クリープ疲労評価)

・・・(原電、神鋼、川重、IHI、東芝、TEC、日揮)

□その他(

)

7. 上記の問題について、従来はどのような対応をとってこられましたか。

■規則に基づく設計コードによる設計 . . . (原電、日揮)

主に弾塑性挙動、疲労、ラチエットなどの評価(原電)

■詳細解析による設計

. . . (原電、神鋼、川重、IHI、東芝、千代田化工、TEC、日揮)

主にクリープ緩和挙動の評価(原電)

■独自の設計 . . . (原電、川重、千代田化工)

弹性FEM→弾塑性クリープ挙動の保守性推定→健全性評価(原電)

告示501号をベースに、クリープ領域への拡張を狙いとした設計方針を整備中

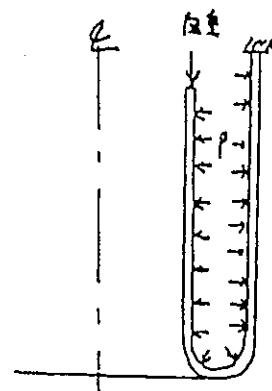
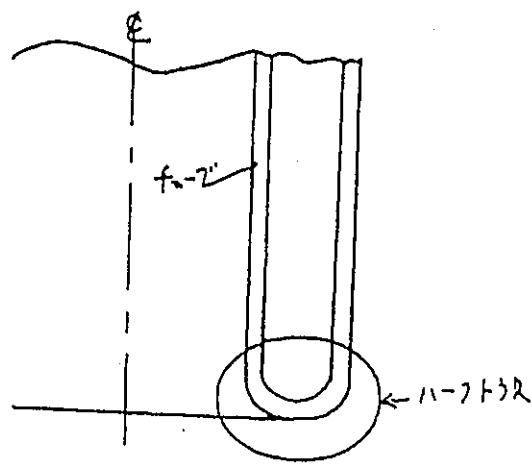
□その他( )

7. 参考になりそうな文献、研究成果報告書などありましたら、ご紹介下さい。

(1) FIRST BREEDER REACTOR TECHNOLOGY のチャート(壁内温度分布推定) . . . (川重)

(2) PNC ベローズ設計指針(案) . (川重)

(3) WRC BULLETIN NO. 107 AND 297 (ノズル、ラグに対する外力) . . . . . (日揮)

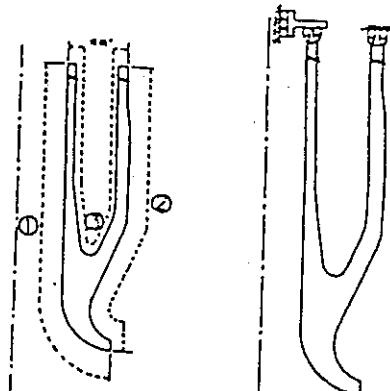


(神鋼)

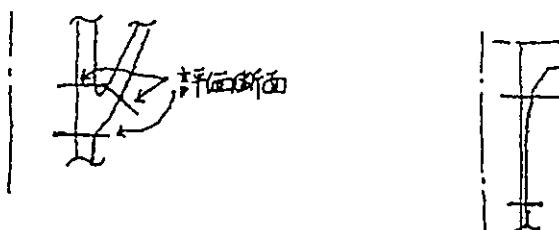
Yピースの例。

ループ型高炉H/C配管入口Yピースの構造例と  
熱応力解析用部分モデルの境界条件。

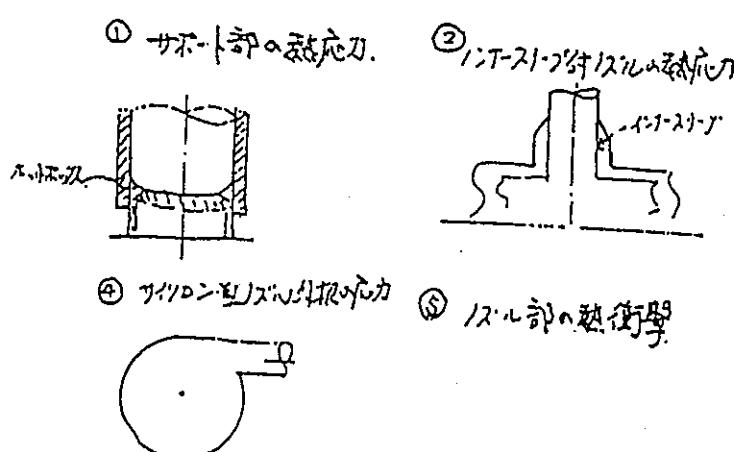
	構度条件
①	配管内ナトリウム（プラント熱通過）
②	配管外ナトリウム（内部熱通過）
③	断熱



(原電)



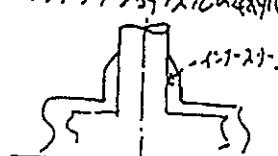
(東芝)



③ 固定管板と別れた部分部の応力 (EBC)



④ シリコン型ノズル部の熱応力



⑤ ノズル部の熱衝撃

(千代田化工)

November 8, 1993

for Discussion on DEVELOPMENT OF SIMPLIFIED METHODS  
TO SIMULATE NON-LINEAR STRUCTURAL BEHAVIORS

SES: PNC/OEC  
Takashi NAGATA

BRIEF DESCRIPTION OF THE PROJECT

(1) Title (in the application of a new budget)

"Synthetical evaluation method development for non-linear structural behaviors by repetitional FEM simulation analysis"

(2) Objective (in the application of a new budget)

"The objective of this project is to develop equations which clearly describe the relationships between the behaviors such as stresses, strains and deformations of the nuclear components and the mechanical loadings such as internal pressure, dead weight, pipe reaction forces, etc. and/or the thermal loadings due to the temperature changes of the fluid, by repetitional FEM simulation analysis. This project makes it possible to significantly reduce the amount or the number of try-and-errors in the present design procedures, to achieve more efficient, economical and rational structural design, and to perform more efficient in-service inspection/monitoring and maintenance of the nuclear plant. At the same time the results are applicable not only to the nuclear components, and the conclusive equations can be expected to have splendidly general applicability."

(3) Financial Base

use the item of governmental (through STA) expenditure for development of nuclear base technology

about ¥30,000,000 for the financial year 1994

(4) Long Term Yearly Plan (in the application of a new budget)

	Mechanical	Thermal	Weld Joints
1994	planning & preparatory analysis		planning
1995	EL	EL(a)	
1996	EL+PL	EL(b)	
1997	EL+PL+C	EL+PL(a)	
1998		EL+PL(b)	preparatory

analysis1999		EL+PL+C(a)	EL
2000		EL+PL+C(b)	EL+PL
2001			EL+PL+C
where	EL	Development of elastic equations	
	EL+PL	elastic-plastic equations	
	EL+PL+C	elastic-plastic-creep equations	
(a)		for structures of fundamental configurations	
(b)		for practical structures	

### (5) Framework of Crossover

This project is pursued as a part of the "crossover" project as;  
 Development of Computational Mechanics Technology to Evaluate Micro and Macro Damage of Nuclear Components and Its Application  
 PNC: "Synthetical Evaluation Method Development for Non-linear Structural Behaviors by Repetitional FEM Simulation Analysis"  
 JAERI: "Development of Damage Evaluation Method for Brittle Structural Materials by Micro Structural Mechanics and Probabilistic Approach"  
 IPCR: "Development of Simulation Method of Strength of Nuclear Components with Taking into Consideration Working and Heat Treatment under their manufacturing"  
 IPCR: Institute of Physical and Chemical Research  
 NRIM: "Investigation of Mechanical Behaviors of Heterogeneous and/or Anisotropic Materials and Development of the Optimization Method of their Micro-Structure"

### (6) Present Status

- 1) Proposal of the conceptional plan by technical divisions/sections to the Headquarters April
- 2) Agreement of the conceptional plan by the HQ May
- 3) Agreement " by the STA August
- 4) Agreement " by the Finance Ministry December
- 5) Application of the concrete plan by technical divisions/sections to the Headquarters January
- 6) Approval of the conceptional plan by the Diet Jan.~May
- 7) Application of the detailed plan including specifications for contract by technical divisions/sections to the Headquarters
- 8) Approval by the relevant sections/divisions and the responsible member
- 9) Negotiation for contract
- 10) Contract

## OBJECTIVES OR TARGETS OF THE PROJECT

(1) Tentatively I would like to define the main objectives or targets of the project as follows;

1) Phase I (1994-1995)

Development of simplified elastic relationships such as stress indices for piping design, with putting emphasis on their development for thermal transient stresses.

2) Phase II (1996-1997)

Development of simplified methods to bound inelastic (local) strains in order to prevent failures

3) Phase III (1997-1998) [1998-2001 in application of the budget]

Development of simplified methods to evaluate strength of the weld joints

I would like to emphasize the importance of the objective in the Phase I.

(2) They are "tentative", and are neither definitive nor exclusive. They shall be determined based on discussions with the persons concerned in advance of the start of the work. They shall be checked & reviewed as well in the course of the project.

(3) The terminology, "bound", is used to describe the development of the simplified inelastic relationships because rational bounding shall be emphasized to define practical design or operational rules for the inelastic structural behaviors which have a lot of effective parameters. Bounding values, or envelop, are more useful for practical evaluation in many cases, and they are effective to describe advancement of the technology in the form of difference from the most probable values. Therefore this terminology does not mean that the conventional bounding methodology shall be objective.

The terminology, "evaluation of strength" is used for the weld joints because metallurgical feature and as-welded configuration shall be taken into account to define "equivalent" stresses or strains based on an engineering point of view. Material strength standards for the based metal are assumed to be applied here with accompanied by engineering factors which correspond geometrical and metallurgical discontinuities. Then the differences of the strength between the weld joint and the base metal are expected to be described clearly and quantitatively, of which should be taken greatest care in the actual structural evaluation.

(4) The reason why I pick up the development of the simplified elastic relationship as the first target is as follows;

"Design by analysis" or evaluation with use of analyzed stress/strain behaviors is more desirable and effective in optimization of design or of procedures of fabrication, operation and maintenance in general. However the complexity, associated with the stress analysis and with the evaluation of the results, prevents its broader application practice.

(5) Then simplified methods to evaluate behaviors of the structures, with including their non-linear response, are earnestly desired to be developed as an useful tool not only in their design and construction but also in their operation and maintenance. The necessity is not only for nuclear power plants but for conventional power/chemical plants.

(6) Non-linearity makes the problem more difficult in general. Here non-linearity, or complexity, can be observed in;

- 1) plasticity/creep and their effects on the structural strength.
- 2) geometrical and metallurgical stress/strain concentration at the weld joint and its effects on the structural strength.
- 3) relationship between geometrical configuration and (local elastic) stresses
- 4) relationship between temperature change of the internal fluid and (local elastic) thermal stresses

(7) Research and development works tend to make their efforts focus on the first two items in usual. It is clear that they are necessary to be pursued. However it should be emphasized as well that the latter two are dominant reasons in practice why engineers hesitate to perform detailed stress evaluation even in these days when FEM can solve almost any structural response.

(8) There exist, at least, two ways to manage the latter two problems;

- 1) Development of useful man-machine interface for general-purpose FEM codes
- 2) Development of simplified equations such as stress indices for piping

(9) The development of man-machine interface as pre/post-processors of general FEM codes is promising under up-to-date significant progress of CPU, especially PCs which offer us availability to manage a large amount of digital data in comfortable circumstances. It can be said that its development will be pursued without any special helps by governmental resources, because the FEM analysis is being necessitated anyway in a sufficient number of cases, where the processors are developed in order to reduce analysis cost on a commercial base.

(10) On the other hand, the development of the simplified equations requires an organized activity and an appropriate public financial supply. Ordinarily works of stress on a commercial base are terminated if an engaged engineer finds out a solution which satisfies design or operational rules. Then fragmental and personal experiences are accumulated, but only without understanding of general relationships. It should be called as a social waste of human efforts.

(11) It should be pointed out that a way which can reduce (elastically calculated) stresses is a better solution than a verification of structural integrity through detailed analysis which considers inelastic behaviors even if the latter may require an excellent knowledge on structural analyses and on material properties. If we succeed to develop a set of simplified relationships which can offer (elastically calculated) stresses with ease in most (70-80% of the problems) cases, the results will be most appreciated by many engineers who are insisted to evaluate structural integrity which requires laborious stress calculations.

(12) Development of the simplified methods should be emphasized not only because of the needs to reduce laborious works but also because it can be accomplished through complete understanding of the phenomena, which is required to be achieved if one tries to utilize the phenomena in optimization of design or procedures.

(13) Simplified relationships, with accompanied by possible differences from the most probable values when the stresses are calculated in detail, are the most preferable completed form of the results. Then any engineer can select the methods whether he performs a detailed analysis or uses a simplified method.

(14) The present circumstance where powerful personal computers are available offers us a chance to develop an advanced simplified method. For example we are able to easily obtain solutions of shell analysis, those of single dimensional heat conduction analysis, values of material properties at corresponding temperatures and results of evaluation with (complicated?) structural design rules. Even a fundamental form of FEM analysis can be introduced as one of the functions if necessary. Then structural engineers can obtain necessary stresses with their PC without usage of a complicated set of tables and figures.

(15) However it was hesitated to define this target clearly when I proposed the project. One of the reasons was because I was afraid that the governmental officers who tend to prefer innovative technologies do not agree, although, by

my opinion, this is a splendid innovation in evaluation of the structural integrity where engineers are free from laborious works in stress calculation.

Another reason was because the same tendency can be found in persons in the field of R&D works, which seems for me to be caused by the fact that they are seldom or never engaged in the works where they have to calculate stresses under a lot of conditions by themselves. It is expected by present knowledge that the development of the simplified relationships for the elastically calculated stresses will be laborious because it will require examinations and comparisons between the results by proposed simplified methods and those by detailed analysis. The laborious works may not produce any fruitful results.

Then I defined it as a preparatory work to develop inelastic relationships.

It is true that it is necessary as the preparatory work. But I would like to insist that the development of simplified equations to obtain elastically calculated stresses is the most important issue to be pursued in the project.

#### SELECTION OF THE CONCRETE ACTION ITEMS

(1) The main objectives shall be defined clearly. However the concrete action items both in US/PVRC and in Japan will be better to be composed such as half contributes directly to the main objective with allowance such that the residual can contribute only indirectly.

(2) One reason is because the financial supply is limited as much as about 200-300 thousand dollars in total for the coming financial year, which is insufficient and requires voluntary efforts of the participants. Lack of the financial supply shall be compensated by allowance in selection of the action items.

(3) The other reason is because it is almost impossible to define all of the innovative simplified procedures clearly in advance. An appropriate allowance in the selection of the action items will be effective to include and encourage innovation in development of the new evaluation methods.

#### ITEMS PROPOSED BY DR.DHALLA

(1) It was informed through a fax dated on Nov.3 from Dr.Dhalla to Nagata that the tentatively proposed items are;

1) Prediction of Inelastic Stresses and Strains by Iterative Elastic Analysis  
by J.M.Corum & R.C.Gwaltney(ORNL)

- 2) Simplified Creep-Fatigue Life Prediction Rule  
by S.Majumdar(ANL)
- 3) Simplified Relaxation Locus Method for Elevated Temperature Design.  
by D.L.Marriott(SESI)
- 4) Simplified Ratcheting Analysis for Bending Problems  
by S.Majumdar(ANL)
- 5) Evaluation of Creep-Fatigue Damage Rules  
by J.J.Blass(ORNL)
- 6) Mode Approximation Method for Dynamic Plastic Deformation of Strain Hardening Structures  
by C.K.Youngdahl(ANL)
- 7) Flaw Assessment Procedure for Welded Components Subjected to Creep-Fatigue Loading  
by M.Ruggles(ORNL)
- 8) Simplified Strain Concentration Factors in Creep Range  
by H.Ziada(W-Hanford)

(2) They can be classified into the following categories;

- a) Simplified estimation of inelastic behaviors  
1), 4), 6), 8)
- b) Simplified estimation of damage due to inelastic strain behaviors  
2), 3), 5)
- c) Fracture mechanics approach to evaluate creep-fatigue damage  
7)

(3) All the items are technically interesting or attractive. I believe that all of them contribute in development of new design or evaluation rules.

However it should be pointed out that it is questionable whether they correspond to the practical needs by engineers who hesitate to apply "design by analysis" or "evaluation based on stress analysis" to their own problems. It seems that they assume that (elastically calculated) stresses have already been obtained, or that they are very easy to be obtained, although in many practical cases calculation of the necessary stress values is laborious by itself, especially in the case where an engineer tries to find out an optimized solution through parametric study.

(4) One of the optional ways is distinction between the works by PVRC and those in Japan, and only the latter is tried to make efforts in simplification of the stress calculation methodology. However I hesitate to use this option because the development of the simplified stress calculation methodology is the most

urgent needs, because I believe that the elastic relationship is the simplest form of the general solutions which is inevitable to develop a general inelastic relationship, and because I believe that useful methods can be developed only under the conditions where practical problems are examined even in the course of development of sophisticated procedures, and introduction of a certain amount of activities to develop simplified stress calculation technology provides a good typical example to examine practicality of the methods.

(5) One of the reasons, why simplification to evaluate (elastically calculated) stresses does not attract attention in the US, will be because the elastic stress analysis seems to be considered as a tool at the preliminary evaluation stage, or because the elastic rules are considered only as screening rules to define the evaluation objectives by detailed inelastic analysis in the US.

But I would like insist again that reduction of the elastically calculated stresses by change of the pre-defined design or procedures is better and more useful than verification by the detailed analysis. Only if simplified methods are successfully supplied, then more number of related engineers will try to find out a better solution.

#### MY OPINION TO DEVELOP GENERALIZED EQUATIONS TO EVALUATE INELASTIC STRUCTURAL BEHAVIORS

(1) My opinion to develop generalized equations to evaluate inelastic structural behaviors is as follows

- 1) find out steady-state relationships between the elastically calculated results and those where simplified constitutive equations such as a power law or an elastic-fully-plastic equation is assumed as  $\sigma - \epsilon$ .
- 2) find out relationships under transition.

(2) For the load-controlled stresses, the steady-state relationship will be sufficient for evaluation. On the other hand the transition relationships will be necessitated to evaluate the deflection-controlled stresses including thermal stresses or peak stresses.

#### OWNERSHIP OF THE RESULTS

(1) All of the results are encouraged to be published through WRC Bulletin or at appropriate international/domestic conferences, but with a formal procedure for technical documents in PNC. Publication will be allowed if a work is not aimed to deny the utilization of Pu.

(2) This project can be defined as one of the efforts of the Japanese government for international contribution to make progress in base technology for nuclear power generation. This means that the results are emphasized to be published. The ordinary procedures in PVRC, where the final reports are published in WRC Bulletin through technical deliberations by corresponding committees or sub-committees, seem to harmonize with this fundamental principle.

(3) On the other hand, the governmental financial supply is offered through PNC. This means that the results should be managed in accordance with the rules of PNC. All of the technical documents are carefully managed in PNC, and they are classified into some categories when they are registered. My intension for the results by PVRC is that they are classified as "for publication". I believe that there exists a sufficient time between the publication in WRC Bulletin and the approval by the responsible committee, at least one interval between the succeeding PVRC meetings, which allows to follow the formal procedures in PNC to obtain permission for publication.

#### PERSPECTIVE OF THE FUTURE FINANCIAL SUPPLY

(1) It will be prudent to make a long range plan at present with assuming that the amount of financial supply to PVRC will be about ¥10,000,000(≈\$100,000) per year for 5 or 6 years.

(2) The amount of the budget, which was agreed by STA, is about 30 million yen. My tentative idea is planning with assumption to divide the resource into 3, 10 million yen to the PVRC for international cooperative works, 10 million yen for Japanese domestic cooperative works, and 10 million yen for the activities by my Structural Engineering Section.

(3) The drastic change in the political situation, which occurred this August in Japan, makes it difficult to predict the final amount of the budget for development of nuclear power generation. I expect that possible decrease of the budget will be able to be absorbed by the last 10 million yen for my section.

(4) I made the proposal with description that the works in the 1994 financial year are only preparatory, and more amount of budget is necessary in the succeeding years to organize the earnest works. Therefore there is possibility of increase of the budget after 1995. However my experience says that any

increase of the budget is usually difficult and it tends to keep the amount for the first year.

#### TIME OF PAYMENT

(1) The payment of the money will be in a month after arrival of the final report. The final report shall be arrive at PNC not later than the appointed date of delivery in the contract, which will be set at, or a little earlier than, the end of March.

(2) In an ordinary case, the financial payment is performed only after completion of the work. The completion shall be confirmed by responsible persons after reception of the final report.

In some cases a part of the money is paid in advance. Regrettably I am not familiar with the conditions which allow this type of payment.

#### CONTRACT

(1) I would like to pursue a contract through HPI if possible, because it will strengthen the activity of HPI.

# THERMAL TRANSIENT STRESSES AT STRUCTURAL DISCONTINUITIES

Takashi NAGATA

Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center, PNC  
4002, Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki, 311-13, Japan

## ABSTRACT

In order to develop a simplified method to evaluate thermal transient stresses at structural discontinuities, 16 detailed analysis results at the junction of the cylinders of different thicknesses with a corner radius of 20mm (8 configurations and respectively 2 thermal transient rates) were examined through comparison with the temperatures and stresses which were calculated under the corresponding conditions by the single dimensional heat conduction analysis and the "shell solution" of the problems.

As a result, it was concluded that the "shell solution" was promising as the base of the simplified method, especially if it is used with recognition of the following characteristics;

- (a) The detailed circumferential membrane stress is fairly smaller than the "shell solution" which is small enough by itself because of compensation between those due to the wall-averaged temperature and those due to  $\Delta T_1$ .
- (b) The detailed longitudinal bending stress, which develops the maximum principal stress, coincides quite well with the "shell solution".
- (c) The detailed circumferential bending stress, which is smaller and therefore less important than the longitudinal one, is slightly greater than the "shell solution". Precisely speaking, the ratio becomes greater as the temperature transient goes slower.
- (d) The nonlinear temperature gradients through the wall and the peak thermal stresses are hardly affected by the structural discontinuities.
- (e) The stress concentration factor at the end of the corner radius is almost independent on the shell diameter, the thickness, the thickness ratio, or the transient rate, and it is as much as 1.29~1.37 for R=20mm.

## 1. INTRODUCTION

In the structural design of the FBR components which use liquid sodium as its reactor coolant, thermal stresses, transient and/or steady, should be evaluated with the greatest care. Thermal stresses are self-limited by their deflection-controlled nature, and greater stresses are allowed in the structural design in comparison to the primary stresses by the internal pressure or the dead weight. On the other hand their evaluation is laborious because of their

non-linearity. In addition to the non-linear material behaviors such as creep and plasticity, the temperature response of the structure, which develops thermal transient stresses, is non-linear by itself even under the most idealized thermal transient of the internal fluid. This non-linearity can be enhanced at the structural discontinuities, where the thermal stresses should need to be evaluated in order to prevent excessive inelastic strain accumulation or (creep-)fatigue cracking, and presently the designers or the analysts have to withstand to spend significant efforts to perform a serious number of numerical analyses in order to obtain the temperature response and the elastic or inelastic stress-strain response of the components.

Simplified analysis methods, which enable to evaluate both elastic and inelastic thermal stresses at structural discontinuities, are expected to be developed.

## 2. DETAILED ANALYSIS RESULTS TO BE EXAMINED

Parametric analyses were performed with use of the FEM analysis code, "FINAS", to elastically calculate thermal transient stresses at the junction of the cylinders of different thickness, which can be considered as one of the most representative to examine behaviors at the structural discontinuities..

The geometrical configurations are listed in the Table 2-1, the thermal transients of the internal fluid are in the Table 2-2, and the material properties are in the Table 2-3. The configurations are those where the inner surface is smooth and the corner radius is 20mm in all of the cases, and the temperature dependency of the material properties is neglected in order to exclude auxiliary non-linearity.

Representative description of the FEM elements is shown as the Fig. 2-1.

## 3. TRADITIONAL SIMPLIFIED METHOD TO EVALUATE THERMAL TRANSIENT STRESSES

ASME B&PV Code SecIII defines the simplified method to evaluate stresses with use of stress indices for the piping components in its NB-3600's.

The equivalent linear stress intensity,  $S_n$ , the peak stress intensity,  $S_p$ , and the membrane stress intensity,  $S_n'$ , of the thermal transient stresses are defined by the following equations;

$$S_n = \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + C_3 E_{ss} |\alpha_s T_s - \alpha_b T_b|$$

$$S_p = \frac{K_3 E \alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + K_3 C_3 E_{ss} |\alpha_s T_s - \alpha_b T_b| + \frac{E \alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$

$$S_n' = C_3'E_{ss} |\alpha_s T_s - \alpha_b T_b|$$

where

## E Modulus of elasticity

$E_a$  is at the average temperature of the two sides of the structural discontinuity.

$\nu$  Poisson's ratio ( $\nu=0.3$  is usually assumed in the code.)

$\alpha$  Coefficient of thermal expansion

$\Delta T_1$  Equivalent linear temperature distribution through the wall

$\Delta T_2$  Nonlinear tempearature distribution through the wall

$T_a$  and  $T_b$  Avarage temperatures of the side (a) and the side (b)

In the case of non-uniform thickness, average thickness "t" in the length of  $\sqrt{D_i}t$  shall be used.

$C_3$ ,  $C_3'$  and  $K_3$  stress indices

Precisely speaking, they are previous, and not the up-to-date equations. The term due to the linear temperature gradient  $\Delta T_1$  was excluded from "Sn" by the revision in 1978. It was assumed that it does not cause meaningful strain concentration, and can be treated as peak stresses. The previous formulations are described here because they corresponds well to the following assumptions on the thermal transient stress behaviors;

- (1) The thermal transient stresses can be represented as a linear sum of those by the equivalent linear temperature gradient through the wall, by the non-linear one, and by the difference in the average temperatures at the structural discontinuities.
- (2) The membrane component should be limited more rigorously.
- (3) The membrane component is mainly caused by the difference in the average temperatures, and it is necessary to consider stress concentration as much as  $C_3'$ .
- (4) The thermal stresses due to the difference in the average temperatures can be enhanced by the gross structural discontinuities as much as  $C_3$  times, and by the local structural discontinuities as much as  $K_3$  times as well.
- (5) The thermal stresses due to the equivalent linear temperature gradient through the wall can be enlarged by the local structural discontinuities as much as  $K_3$  times, but it is not affected with the gross structural discontinuities.
- (6) The thermal stresses due to the non-linear temperature gradient through the wall is affected neither with the gross structural discontinuities nor with the local ones.

It should be worthy to try to use the above assumptions as the first step to examine the thermal transient stress behaviors.

A routine to calculate the one-dimentional heat conduction in the form of Fourier series was developed on the personal computer, which allowed to

calculate necessary  $T_m$ ,  $\Delta T_1$  and  $\Delta T_2$  easily, and the coefficient  $C_3$  was tried to be determined through regression of the detailed FEM analysis results.

Fig.3-1 and Fig.3-2 show the representative results. The thermal bending stresses corresponding to  $\Delta T_1$  by the one-dimentional heat conduction analysis were subtracted from the longitudinal bending stresses by the detailed FEM analysis, and the residual was compared with the wall-averaged temperature difference,  $T_a - T_b$ , in order to obtain the coefficient  $C_3$  by regression. Individually the correspondence was not so wrong, and the regression results coincided well with the detailed calculation from the engineering point of view.

However a problem arose. The obtained coefficients,  $C_3$ , differed between the two thermal transient conditions, and they seemed difficult to be written as a function of the geometrical parameters.

#### 4.THERMAL STRESSES BY THE SHELL SOLUTION WITH USE OF THE SINGLE DIMENTIONAL HEAT CONDUCTION ANALYSIS

As the second step, the function to calculate a simplified shell solution was added to the routine on the personal computer.

Here a longitudinally uniform temperature distribution, which could be calculated by the one-dimentional heat conduction analysis, was assumed for both of the two cylinders, and the precise configuration at the junction such as the corner radius was neglected. Then the shell solution could be easily obtained with use of the simultaneous equations which corresponded to continuity of the deflection and the rotation.

Frankly speaking, it was hesitated to use this simple shell solution because it was obvious that the assumption of the longitudinal uniform temperature distribution was suspicious near the junction as is shown in Appendix A.

Fig.4-1 and Fig.4-2 show examples of the calculations. The use of the shell solution makes it possible to examine the stress components by  $\Delta T_m$ ,  $\Delta T_{11}$ , and  $\Delta T_{12}$ , separately. It should be noted that;

- (1) the circumferential membrane stress due to the wall-averaged temperature difference is partially compensated by the difference in the temperature gradient through the wall,
- (2) the longitudinal bending stress due to the temperature gradient through the wall of the thicker cylinder is dominant, and
- (3) it shows a meaningful stress concentration, typical in the shell deformation

These characteristics seem conceptionally different from the assumptions in the conventional piping equation.

## 5. COMPARISON OF THE SHELL SOLUTION WITH THE DETAILED ANALYSIS RESULTS

Typical examples of the comparison of the equivalent linear stress distribution are shown from Fig.5-1 to Fig.5-3. The detailed analysis results and the simplified shell solution are compared at the time when the thermal transient stresses take their maximum in their histories. Fig.5-4 and Fig.5-5 show the comparison of the peak stress distributions. From these figures, it can be said that;

- (1) generally stress distributions coincide well,
- (2) the circumferential membrane stress by the detailed analysis is fairly smaller than the "shell solution" near the junction,
- (3) the longitudinal bending stress, which develops the maximum principal stress, coincides even near the end of the corner radius,
- (4) the circumferential bending stress by the detailed analysis is slightly greater near the junction,
- (5) the peak stress on the inner surface just coincides with the thermal peak stress except the limited length of the thicker cylinder in the neighbourhood of the junction, and
- (6) a serious peak stress concentration can be observed near the end of the corner radius.

Fig.5-6 ~ Fig.5-8 show typical examples of the comparison of the stress histories near the end of the corner radius where the thermal transient stresses take their maximum in their geometrical distribution. It can be said that;

- (7) generally the ratio of the detailed results to the shell solution is kept constant through the transient
- (8) the longitudinal bending stress coincides quite well
- (9) the circumferential bending stress by the detailed analysis become greater as the time elapses or as the transient becomes mild

Table 5-1 shows the regression results of the detailed equivalent linear stress components with the simplified "shell solution" for all of the parametric analysis results. It can be said that;

- (a) the coefficient  $C_3$  for the circumferential membrane stress was  $0.06 \sim 0.29$  and different case by case. The maximum value will be able to be used practically as the stress index, because the shell solution is sufficiently small because of counterbalance between  $\Delta T_m$  and  $\Delta T_l$ .
- (b) the coefficient  $C_3$  for the longitudinal bending stress was  $0.91 \sim 1.04$ , and shows almost no dependency on the configuration or on the transient rate. Unity will be appropriate as the stress index.

- (c) the coefficient  $C_3$  for the circumferential bending stress was  $1.03 \sim 1.49$ , and shows noticeable increase as the transient rate deceases.

Fortunately the circumferential bending stress has less importance in stress evaluation because it is smaller than the longitudinal bending stress even after summation with the membrane stress component. Therefore it seems unnecessary to determine the stress index for it.

## 6. STRESS CONCENTRATION FACTOR AT THE CORNER

In order to examine the local stress concentration, the surface stress history exclusive of the thermal peak stress component was compared to the equivalent linear stress history. Typical examples are shown in Fig.6-1 and the regression results for all of the cases are presented in Table 6-1. It can be concluded that

- (1) No stress concentration can be observed on the smooth inner surface,
- (2) The stress concentration factor for the longitudinal stress on the outer surface is as much as  $1.29 \sim 1.37$  for the corner radius of 20mm, and it is almost independent on the shell diameter, the thickness, the thickness ratio, or the transient rate.

## 7. CONCLUSIONS

The "shell solution" with the aids of the one-dimentional heat conduction analysis is promising as the base of the simplified method to evaluate thermal transient stresses, especially if it is used with recognition of the following characteristics;

- (a) The detailed circumferential membrane stress is fairly smaller than the "shell solution" which is small enough by itself because of compensation between those due to the wall-averaged temperature and those due to  $\Delta T_1$ .
- (b) The detailed longitudinal bending stress, which develops the maximum principal stress, coincides quite well with the "shell solution".
- (c) The detailed circumferential bending stress, which is smaller and therefore less important than the longitudinal one, is slightly greater than the "shell solution". Precisely speaking, the ratio becomes greater as the temperature transient goes slower.
- (d) The nonlinear temperature gradients through the wall and the peak thermal stresses are hardly affected by the structural discontinuities.
- (e) The stress concentration factor at the end of the corner radius is almost independent on the shell diameter, the thickness, the thickness ratio, or

the transient rate, and it is as much as 1.29~1.37 for R=20mm.

Examinations of the additional detailed analysis results for the junctions with different corner radiiuses and for the tapered junctions are undergoing to determine the final form of the equation and the values of the necessary coefficients.

In addition it will be worthy to mention the followings as well;

- (1) Comparison with the simplified solution was effective to understand the complicated behaviors of the thermal transient stresses.
- (2) Appropriateness of the conventional simplified method in ASME B&PV Code NB-3600 to evaluate the thermal transient stresses should be re-examined because the conceptual basis are suspicious.

The characteristic features of the "shell solution", such as compensation of the circumferential membrane stress by  $\Delta T_1$ , and remarkable increase of the stress due to  $\Delta T_1$ , are apparently observed on the detailed results.

TABLE 2-1 CONFIGURATION OF THE MODELS

case No.	$t_1$ mm	$t_2$ mm	$R_i$ mm	$r$ mm	Note
A-01	40	60	1600	20	
A-02	40	60	1600	"	Thermal liners; 304 plate of 10mm & Na of 10mm
A-03	40	80	1600	"	
A-04	40	60	2000	"	
A-05	30	70	520	"	
A-06	30	70	700	"	
A-07	30	80	520	"	
A-08	40	70	520	"	

- $t_1$  the wall thickness of the thinner cylinder  
 $t_2$  the wall thickness of the thicker cylinder  
 $R_i$  the inner radius of the cylinders  
 (equal between the thinner and the thicker)  
 $r$  the corner radius at the junction

TABLE 2-2 THERMAL TRANSIENT CONDITION OF THE INTERNAL FLUID

Condition ① (- 2 °C/sec)		Condition ② (- 0.2 °C/sec)		Note
time	Temp	time	Temp	
~ 0 s	500°C	~ 0 s	500°C	
100s	300°C	1000s	300°C	
100s ~	300°C	1000s ~	300°C	500 ⇒ 300°C (linear)

TABLE 2-3 MATERIAL PROPERTIES

Material Property		value			Note
Modulus of Elasticity	E	17200	Kgf/mm <sup>2</sup>		
Poisson's Ratio	$\nu$	0.295	mm/mm/°C		
Thermal Expansion Coeff.	$\alpha$	19.57 x10 <sup>-6</sup>			
Heat Conductivity	$\lambda$	4.70 x10 <sup>-6</sup>	Kcal/(mm*sec*°C)		
Specific Heat	C <sub>p</sub>	0.132	Kcal/(kg*°C)		
Density	$\rho$	7.86 x10 <sup>-6</sup>	Kg/mm <sup>3</sup>		

熱応力評価93-1-1-02-02

TABLE 5-1 ANALYSIS RESULTS OF THE EQUIVALENT LINEAR STRESSES

[CIRCUMFERENTIAL MEMBRANE STRESS  $\sigma_{\text{cm}} = C_2 + \sigma_{\text{cm,sh}}$ ]

No.	$r_a$	$t_a$	$r_b$	$t_b$	$C_2$	Std. Dev	$\sigma_{\text{cm, max}}$	$C_2 + \sigma_{\text{cm, max}}$
A-01-1	1620	40	1630	60	0.25302	0.138	1.431 (200s)	1.705 (300s)
A-02-1	1620	40	1630	60	0.20173	0.169	1.191 (300s)	1.296 (500s)
A-03-1	1620	40	1640	80	0.28685	0.100	2.620 (300s)	2.808 (300s)
A-04-1	2020	40	2030	60	0.27814	0.172	1.553 (200s)	1.874 (300s)
A-05-1	535	30	555	70	0.17493	0.196	2.309 (300s)	1.997 (300s)
A-06-1	715	30	735	70	0.24059	0.035	2.775 (300s)	2.745 (300s)
A-07-1	535	30	560	80	0.22770	0.078	2.981 (300s)	2.908 (300s)
A-08-1	540	40	555	70	0.06093	0.228	1.010 (300s)	0.525 (300s)
A-01-2	1630	40	1630	60	0.19960	0.107	0.801 (1000s)	0.809 (1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	0.16146	0.053	0.841 (1050s)	0.801 (1100s)
A-03-2	1620	40	1640	80	0.25187	0.202	1.849 (1000s)	1.873 (1050s)
A-04-2	2020	40	2030	60	0.21527	0.115	0.865 (1000s)	0.872 (1000s)
A-05-2	535	30	555	70	0.18981	0.146	1.274 (1000s)	1.318 (1000s)
A-06-2	715	30	735	70	0.23583	0.183	1.597 (1000s)	1.637 (1000s)
A-07-2	535	30	560	80	0.22351	0.202	1.870 (1000s)	1.897 (1000s)
A-08-2	540	40	555	70	0.10589	0.067	0.613 (1100s)	0.621 (1050s)

 $\sigma_{\text{cm}}$  the circumferential membrane stress by the FEM analysis $\sigma_{\text{cm,sh}}$  the circumferential membrane stress by the shell solution

Std. Dev the standard deviation

[LONGITUDINAL BENDING STRESS  $\sigma_{\text{zb}} = C_2 + \sigma_{\text{zb,sh}}$ ]

No.	$r_a$	$t_a$	$r_b$	$t_b$	$C_2$	Std. Dev	$\sigma_{\text{zb, max}}$	$C_2 + \sigma_{\text{zb, max}}$
A-01-1	1620	40	1630	60	0.94793	0.565	52.034 (110s)	52.039 (120s)
A-02-1	1620	40	1630	60	0.94874	0.368	33.482 (160s)	33.710 (160s)
A-03-1	1620	40	1640	80	0.93829	1.026	56.863 (120s)	56.820 (120s)
A-04-1	2020	40	2030	60	0.95029	0.561	52.174 (110s)	52.164 (120s)
A-05-1	535	30	555	70	0.92271	1.301	51.322 (105s)	51.335 (105s)
A-06-1	715	30	735	70	0.93413	1.461	51.931 (105s)	51.873 (105s)
A-07-1	535	30	560	80	0.94452	1.599	50.868 (105s)	50.906 (105s)
A-08-1	540	40	555	70	0.91452	0.862	53.873 (120s)	53.972 (120s)
A-01-2	1620	40	1630	60	0.96839	0.247	16.775 (1000s)	16.718 (1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	0.97146	0.399	15.140 (1000s)	15.062 (1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	0.97572	0.510	23.752 (1000s)	23.766 (1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	0.96790	0.233	16.765 (1000s)	16.706 (1000s)
A-05-2	535	30	555	70	1.01026	0.563	18.132 (1000s)	18.202 (1000s)
A-06-2	715	30	735	70	1.01212	0.518	18.108 (1000s)	18.156 (1000s)
A-07-2	535	30	560	80	1.03894	0.653	20.473 (1000s)	20.647 (1000s)
A-08-2	540	40	555	70	0.96916	0.559	20.670 (1000s)	20.663 (1000s)

 $\sigma_{\text{zb}}$  the longitudinal bending stress by the FEM analysis $\sigma_{\text{zb,sh}}$  the longitudinal bending stress by the shell solution

(CIRCUMFERENTIAL BENDING STRESS  $\sigma_{cb} = C_2 + \sigma_{cb,sh}$ )

No.	$r_a$	$t_a$	$r_b$	$t_b$	$C_2$	Std. Dev	$\sigma_{cb, max}$	$C_2 + \sigma_{cb, sh, max}$
A-01-1	1620	40	1630	60	1.04294	1.483	44.094 (110s)	44.900 (110s)
A-02-1	1620	40	1630	60	1.06626	1.354	27.880 (160s)	28.702 (160s)
A-03-1	1620	40	1640	80	1.04288	1.756	45.566 (110s)	46.469 (110s)
A-04-1	2020	40	2030	60	1.04128	1.462	44.162 (110s)	44.957 (110s)
A-05-1	535	30	555	70	1.06891	2.534	39.976 (105s)	41.119 (105s)
A-06-1	715	30	735	70	1.07955	2.461	40.396 (105s)	41.495 (105s)
A-07-1	535	30	560	80	1.08143	2.627	39.850 (105s)	41.046 (105s)
A-08-1	540	40	555	70	1.02641	1.865	44.346 (110s)	45.325 (110s)
A-01-2	1620	40	1630	60	1.23181	0.712	13.536(1000s)	13.586(1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	1.20740	0.800	12.520(1000s)	12.532(1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	1.32918	1.409	17.219(1000s)	17.441(1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	1.23031	0.699	13.518(1000s)	13.568(1000s)
A-05-2	535	30	555	70	1.43403	1.036	12.228(1000s)	12.417(1000s)
A-06-2	715	30	735	70	1.43384	1.000	12.204(1000s)	12.382(1000s)
A-07-2	535	30	560	80	1.49359	1.227	13.420(1000s)	13.750(1000s)
A-08-2	540	40	555	70	1.29989	1.227	15.769(1000s)	15.892(1000s)

$\sigma_{cb}$  the circumferential bending stress by the FEM analysis

$\sigma_{cb,sh}$  the circumferential bending stress by the shell solution

TABLE 6-1 ANALYSIS RESULTS OF THE TOTAL STRESSES ON THE SURFACE

(LONGITUDINAL STRESS ON THE INNER SURFACE  $\sigma_{zz} = K_2 \cdot \sigma_{nn} - E\alpha \Delta T_2 / (1-\nu)$ )

No.	$r_s$	$t_s$	$r_b$	$t_b$	$K_2$	Std. Dev.	$\sigma_{zz, i, max}$	The max. val.
A-01-1	1620	40	1630	60	0.96435	0.315	66.254 (100s)	65.892 (100s)
A-02-1	1620	40	1630	60	0.95893	0.217	39.865 (140s)	39.666 (140s)
A-03-1	1620	40	1640	80	0.96126	0.401	69.908 (100s)	69.443 (100s)
A-04-1	2020	40	2030	60	0.96204	0.311	66.237 (100s)	65.908 (100s)
A-05-1	535	30	555	70	0.98229	0.230	61.948 (100s)	61.647 (100s)
A-06-1	715	30	735	70	0.96990	0.217	61.885 (100s)	61.621 (100s)
A-07-1	535	30	560	80	0.98174	0.235	61.479 (100s)	61.168 (100s)
A-08-1	540	40	555	70	0.98560	0.388	68.644 (100s)	68.183 (100s)
A-01-2	1620	40	1630	60	0.96931	0.106	19.145(1000s)	19.068(1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	0.97039	0.122	17.453(1000s)	17.449(1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	0.96209	0.164	25.721(1000s)	25.617(1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	0.96771	0.106	19.098(1000s)	19.022(1000s)
A-05-2	535	30	555	70	0.98373	0.101	19.494(1000s)	19.418(1000s)
A-06-2	715	30	735	70	0.97270	0.110	19.272(1000s)	19.195(1000s)
A-07-2	535	30	560	80	0.98166	0.112	21.760(1000s)	21.678(1000s)
A-08-2	540	40	555	70	0.98662	0.125	23.289(1000s)	23.202(1000s)

 $\sigma_{zz}$  the longitudinal total stress on the inner surface  
by the FEM analysis(compounded by  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  and  $\tau_{rz}$ ) $\sigma_{nn}$  the longitudinal equivalent linear stress on the inner surface  
by the FEM analysis $\Delta T_2$  the nonlinear temperature gradient on the inner surface  
by the single dimensional heat conduction analysis

Std. Dev. the standard deviation

 $\sigma_{zz, i, max}$  the maximum value of the  $\sigma_{zz}$ 

The max. val. the maximum value of the right side of the equation

(CIRCUMFERENTIAL STRESS ON THE INNER SURFACE  $\sigma_{zz} = K_2 \cdot \sigma_{nn} - E\alpha \Delta T_2 / (1-\nu)$ )

No.	$r_s$	$t_s$	$r_b$	$t_b$	$K_2$	Std. Dev.	$\sigma_{zz, i, max}$	The max. val.
A-01-1	1620	40	1630	60	1.00161	0.306	60.835 (100s)	60.885 (100s)
A-02-1	1620	40	1630	60	1.00762	0.071	36.105 (140s)	36.132 (140s)
A-03-1	1620	40	1640	80	1.00506	0.475	62.315 (100s)	62.436 (100s)
A-04-1	2020	40	2030	60	1.00231	0.325	60.873 (100s)	60.949 (100s)
A-05-1	535	30	555	70	1.01783	0.674	53.078 (100s)	53.361 (100s)
A-06-1	715	30	735	70	1.01788	0.842	53.248 (100s)	53.686 (100s)
A-07-1	535	30	560	80	1.03781	0.791	53.544 (100s)	53.961 (100s)
A-08-1	540	40	555	70	0.99930	0.276	61.479 (100s)	61.295 (100s)
A-01-2	1620	40	1630	60	1.04895	0.178	17.138(1000s)	17.163(1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	1.06070	0.301	16.058(1000s)	16.112(1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	1.09336	0.395	21.750(1000s)	21.919(1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	1.05253	0.187	17.144(1000s)	17.175(1000s)
A-05-2	535	30	555	70	1.09548	0.176	15.337(1000s)	15.429(1000s)
A-06-2	715	30	735	70	1.11400	0.218	15.420(1000s)	15.555(1000s)
A-07-2	535	30	560	80	1.12378	0.245	17.108(1000s)	17.179(1000s)
A-08-2	540	40	555	70	1.03738	0.182	19.606(1000s)	19.609(1000s)

(LONGITUDINAL STRESS ON THE OUTER SURFACE  $\sigma_{z\cdot o} = K_2 \cdot \sigma_{n\cdot o} - E \alpha \Delta T_{2o} / (1 - \nu) ]$

No.	$r_a$	$t_a$	$r_b$	$t_b$	$K_2$	Std. Dev.	$\sigma_{z\cdot o, max}$	The max. val.
A-01-1	1620	40	1630	60	1.31610	1.076	-55.977 (120s)	-56.070 (120s)
A-02-1	1620	40	1630	60	1.32606	0.412	-37.095 (180s)	-36.840 (180s)
A-03-1	1620	40	1640	80	1.33674	1.522	-64.423 (140s)	-63.657 (120s)
A-04-1	2020	40	2030	60	1.31526	1.079	-56.113 (120s)	-56.205 (120s)
A-05-1	535	30	555	70	1.29965	0.919	-56.263 (120s)	-56.580 (110s)
A-06-1	715	30	735	70	1.28855	0.962	-56.419 (120s)	-56.759 (110s)
A-07-1	535	30	560	80	1.30090	0.967	-55.796 (120s)	-56.078 (110s)
A-08-1	540	40	555	70	1.33940	1.329	-60.287 (140s)	-59.804 (120s)
A-01-2	1620	40	1630	60	1.32245	0.190	-19.195 (1000s)	-19.377 (1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	1.31293	0.195	-17.060 (1000s)	-17.130 (1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	1.37227	0.416	-29.400 (1000s)	-29.787 (1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	1.32161	0.188	-19.167 (1000s)	-19.350 (1000s)
A-05-2	535	30	555	70	1.32430	0.284	-22.148 (1000s)	-22.431 (1000s)
A-06-2	715	30	735	70	1.31287	0.273	-21.915 (1000s)	-22.192 (1000s)
A-07-2	535	30	560	80	1.33472	0.365	-25.396 (1000s)	-25.745 (1000s)
A-08-2	540	40	555	70	1.36355	0.318	-25.080 (1000s)	-25.377 (1000s)

(CIRCUMFERENTIAL STRESS ON THE OUTER SURFACE  $\sigma_{z\cdot o} = K_2 \cdot \sigma_{n\cdot o} - E \alpha \Delta T_{2o} / (1 - \nu) ]$

No.	$r_a$	$t_a$	$r_b$	$t_b$	$K_2$	Std. Dev.	$\sigma_{z\cdot o, max}$	The max. val.
A-01-1	1620	40	1630	60	1.06149	0.335	-33.647 (120s)	-33.463 (120s)
A-02-1	1620	40	1630	60	1.05443	0.559	-21.696 (160s)	-21.337 (160s)
A-03-1	1620	40	1640	80	1.06334	0.451	-35.355 (120s)	-35.140 (120s)
A-04-1	2020	40	2030	60	1.05792	0.342	-33.609 (120s)	-33.419 (120s)
A-05-1	535	30	555	70	1.05881	0.795	-31.144 (110s)	-30.800 (110s)
A-06-1	715	30	735	70	1.03551	0.891	-30.850 (110s)	-30.433 (110s)
A-07-1	535	30	560	80	1.03772	0.904	-30.363 (110s)	-29.944 (110s)
A-08-1	540	40	555	70	1.09983	0.357	-35.166 (120s)	-35.053 (120s)
A-01-2	1620	40	1630	60	1.00559	0.193	-10.691 (1000s)	-10.655 (1000s)
A-02-2	1620	40	1630	60	0.99570	0.327	-9.699 (1000s)	-9.648 (1000s)
A-03-2	1620	40	1640	80	0.97089	0.431	-13.813 (1000s)	-13.658 (1000s)
A-04-2	2020	40	2030	60	0.99986	0.199	-10.619 (1000s)	-10.577 (1000s)
A-05-2	535	30	555	70	0.96293	0.191	-9.902 (1000s)	-9.796 (1000s)
A-06-2	715	30	735	70	0.92510	0.222	-9.536 (1000s)	-9.394 (1000s)
A-07-2	535	30	560	80	0.92827	0.226	-10.602 (1000s)	-10.449 (1000s)
A-08-2	540	40	555	70	1.04885	0.235	-13.301 (1000s)	-13.284 (1000s)

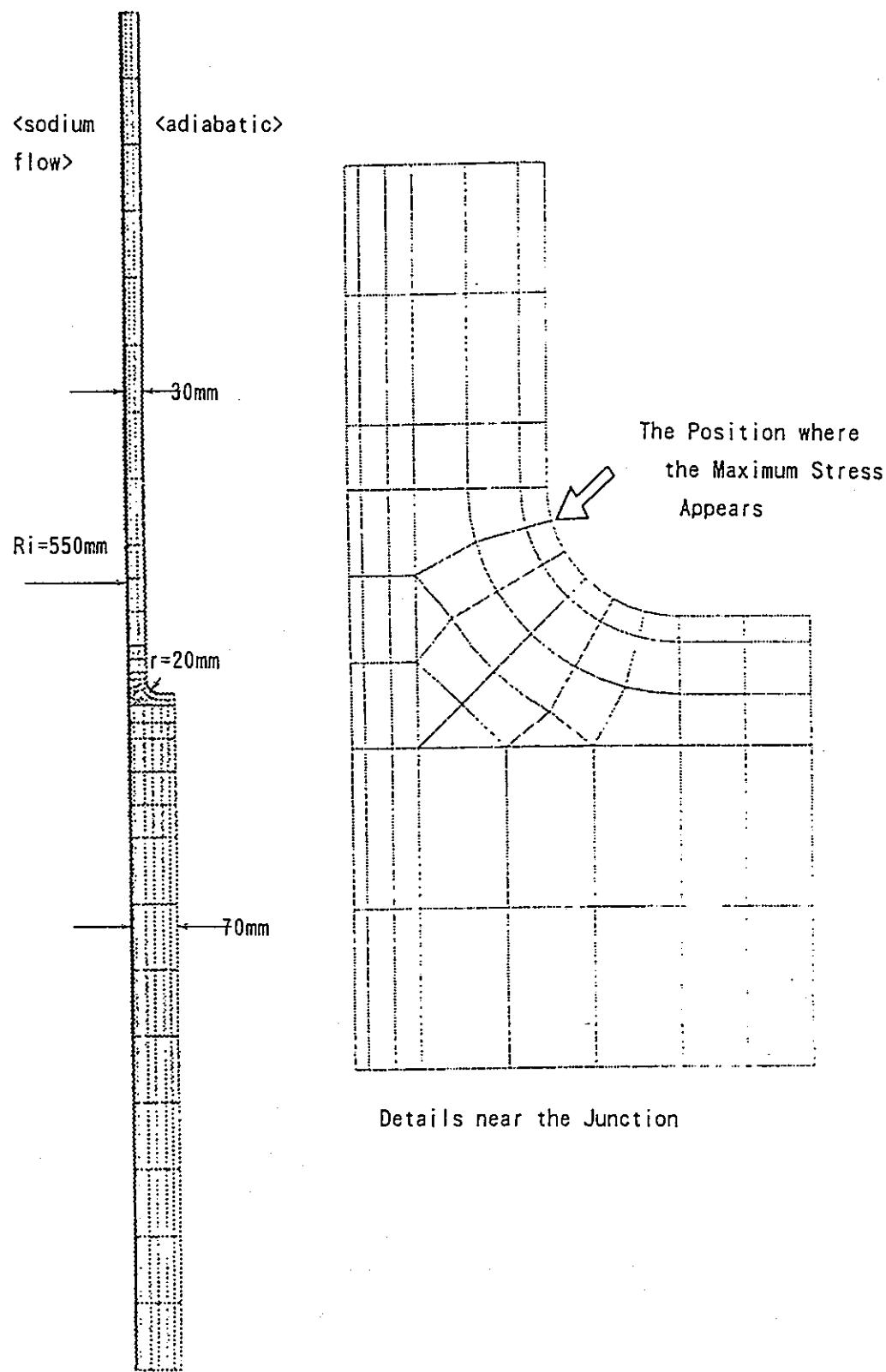


FIG 2-1 AN EXAMPLE OF THE FEM MODEL

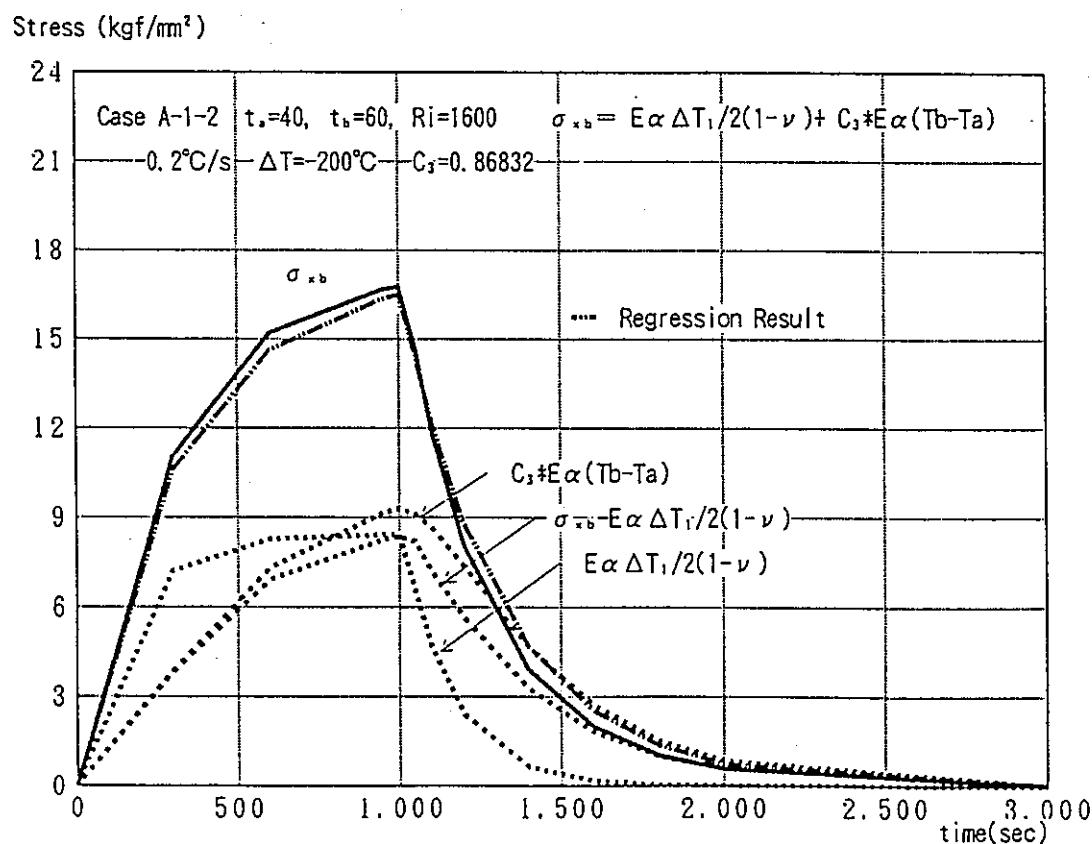
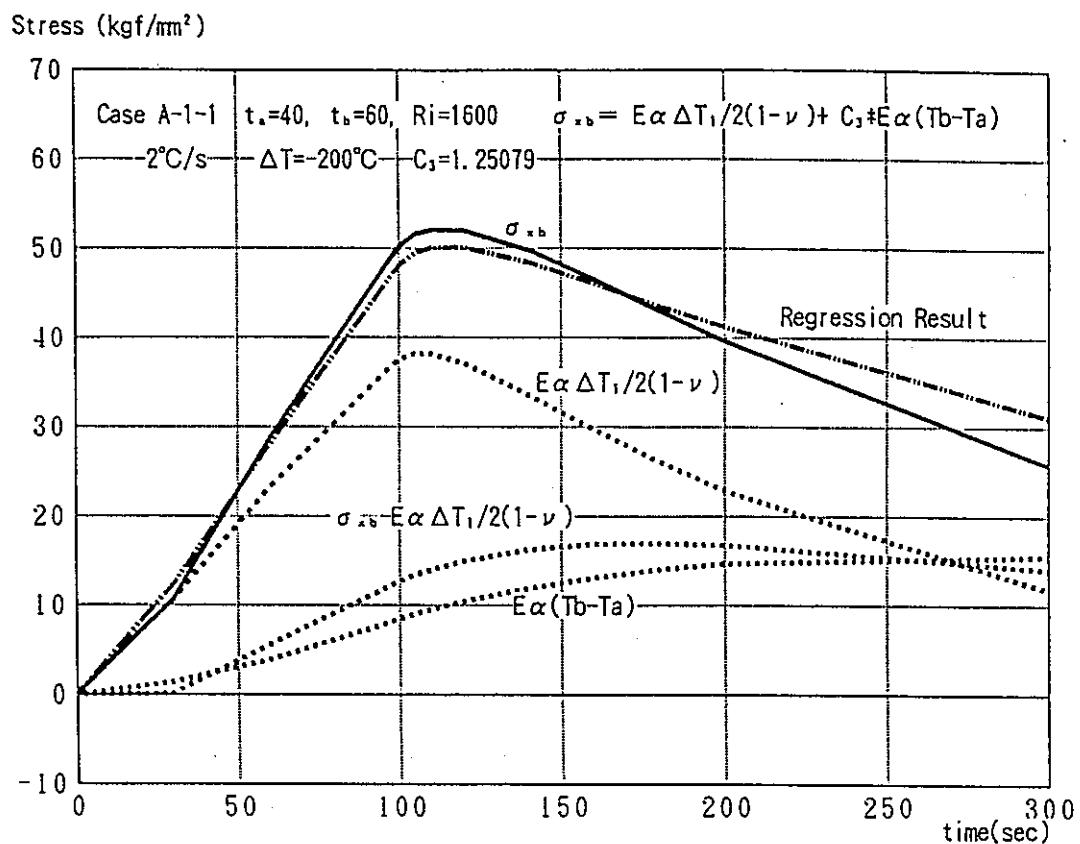


FIG. 3-1 COMPARISON WITH THE CONVENTIONAL SIMPLIFIED ESTIMATION IN THE PIPING EQUATION

熱応力評価93-1-1-06-02

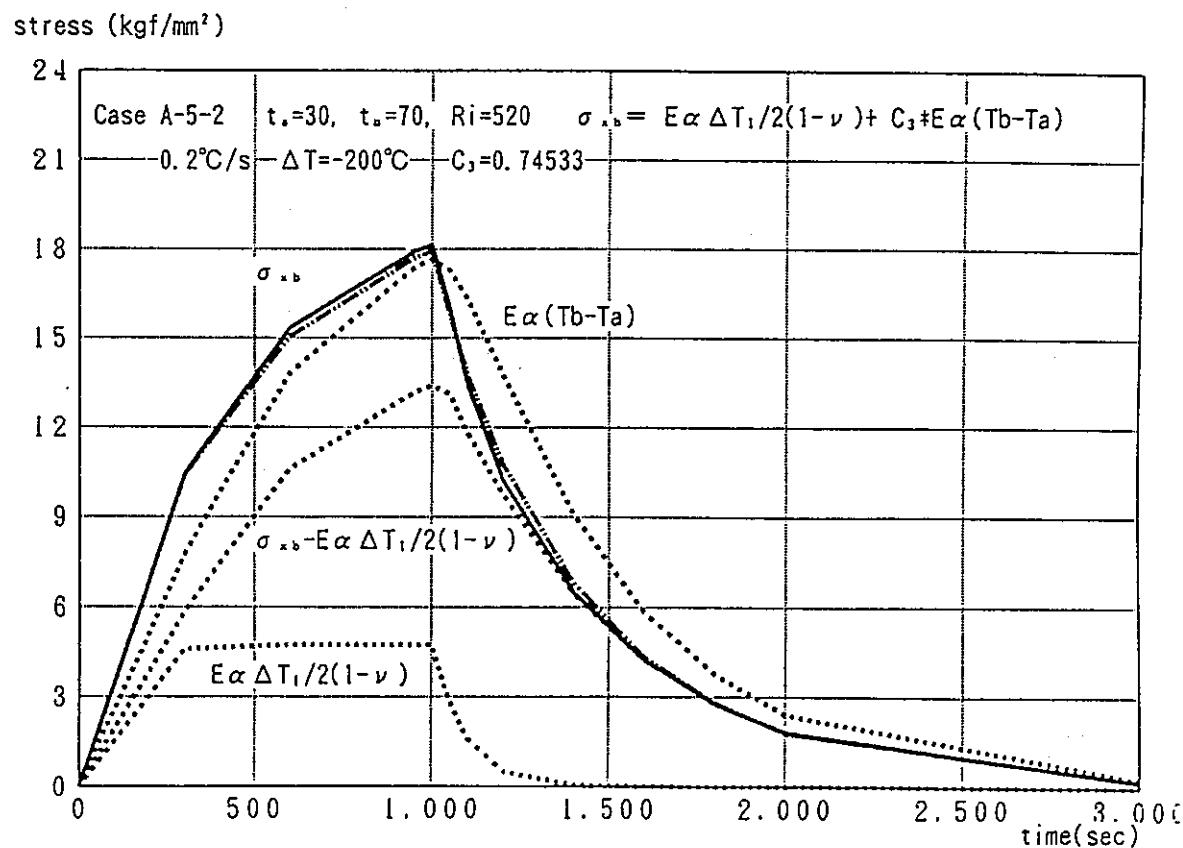
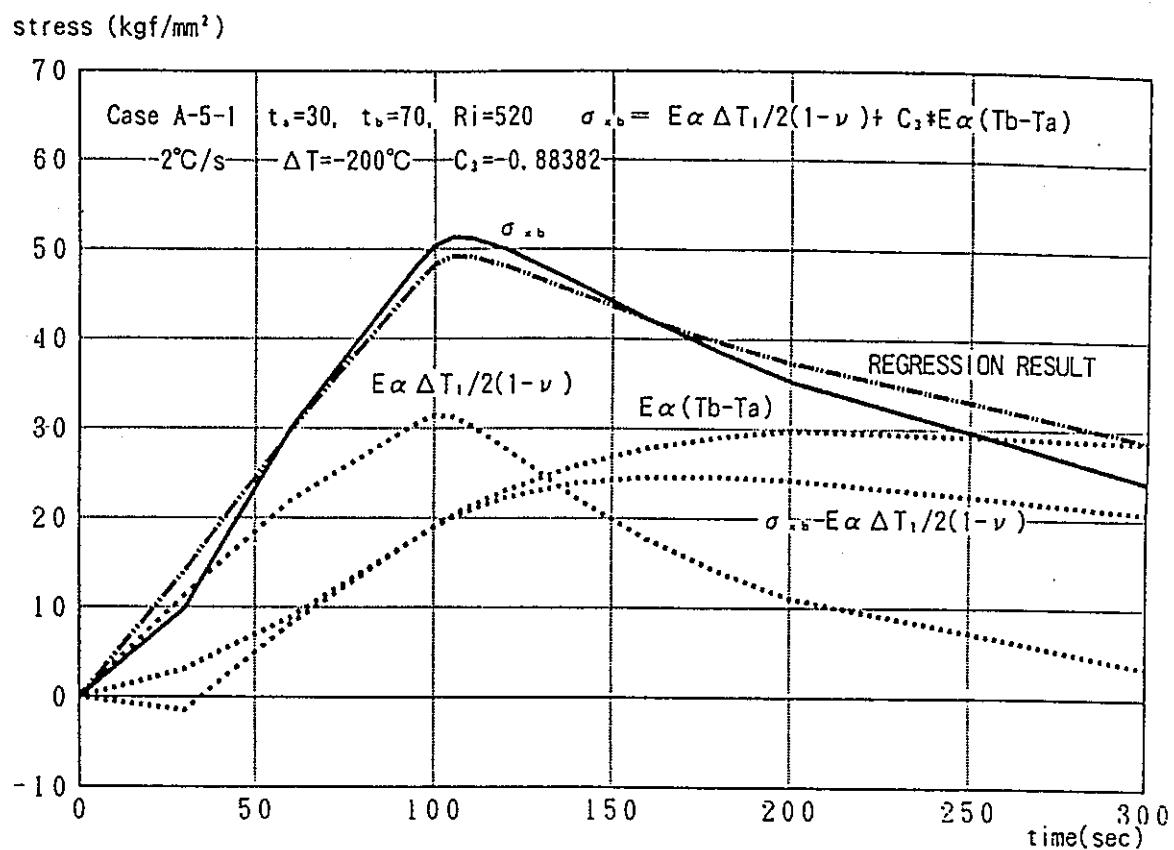


FIG. 3-2 COMPARISON WITH THE TRADITIONAL SIMPLIFIED ESTIMATION IN THE PIPING EQUATION

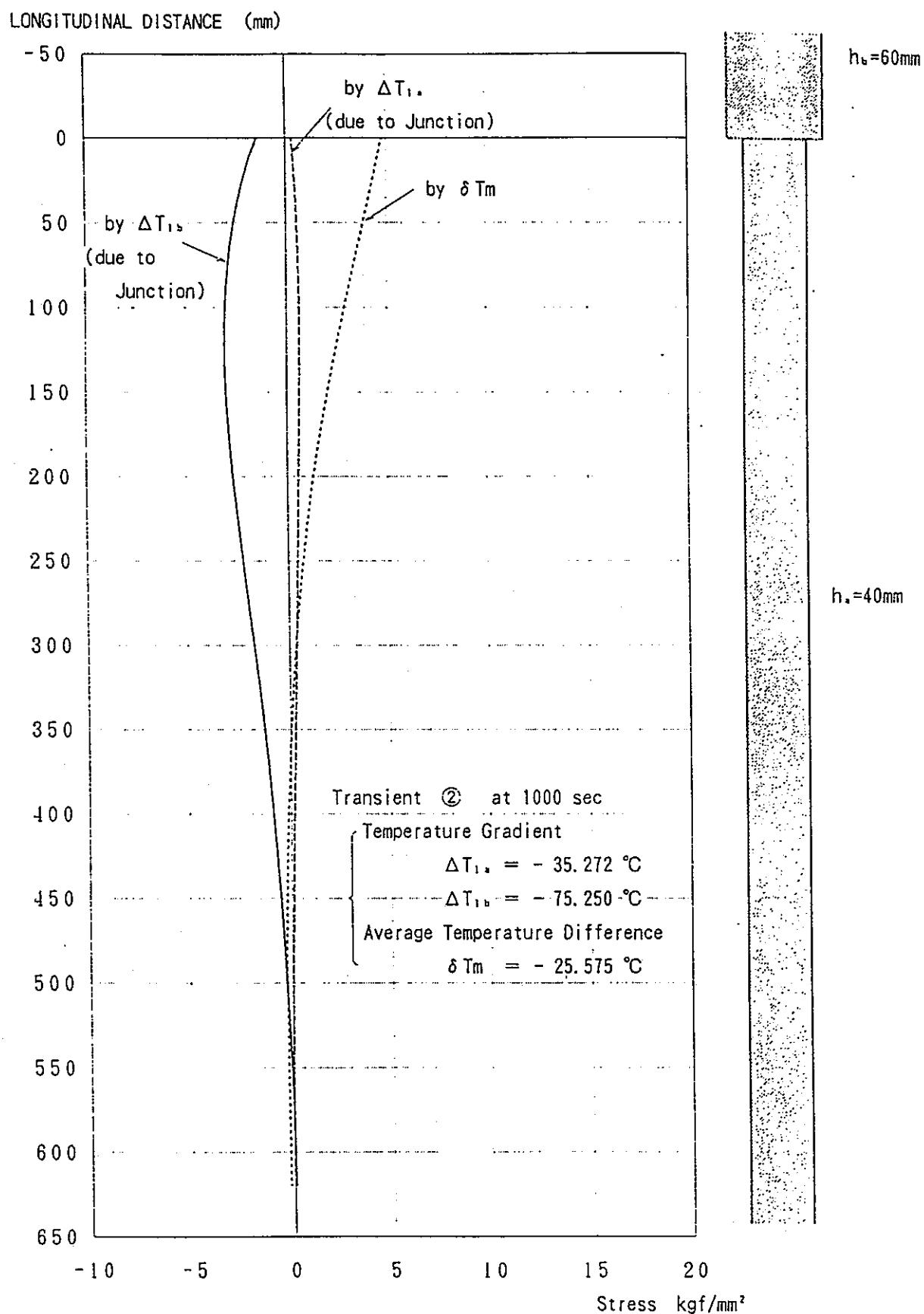


FIG. 4-1 CIRCUMFERENTIAL MEMBRANE STRESSES BY THE SHELL SOLUTION case A-1-2

熱応力評価93-1-1-08-04

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

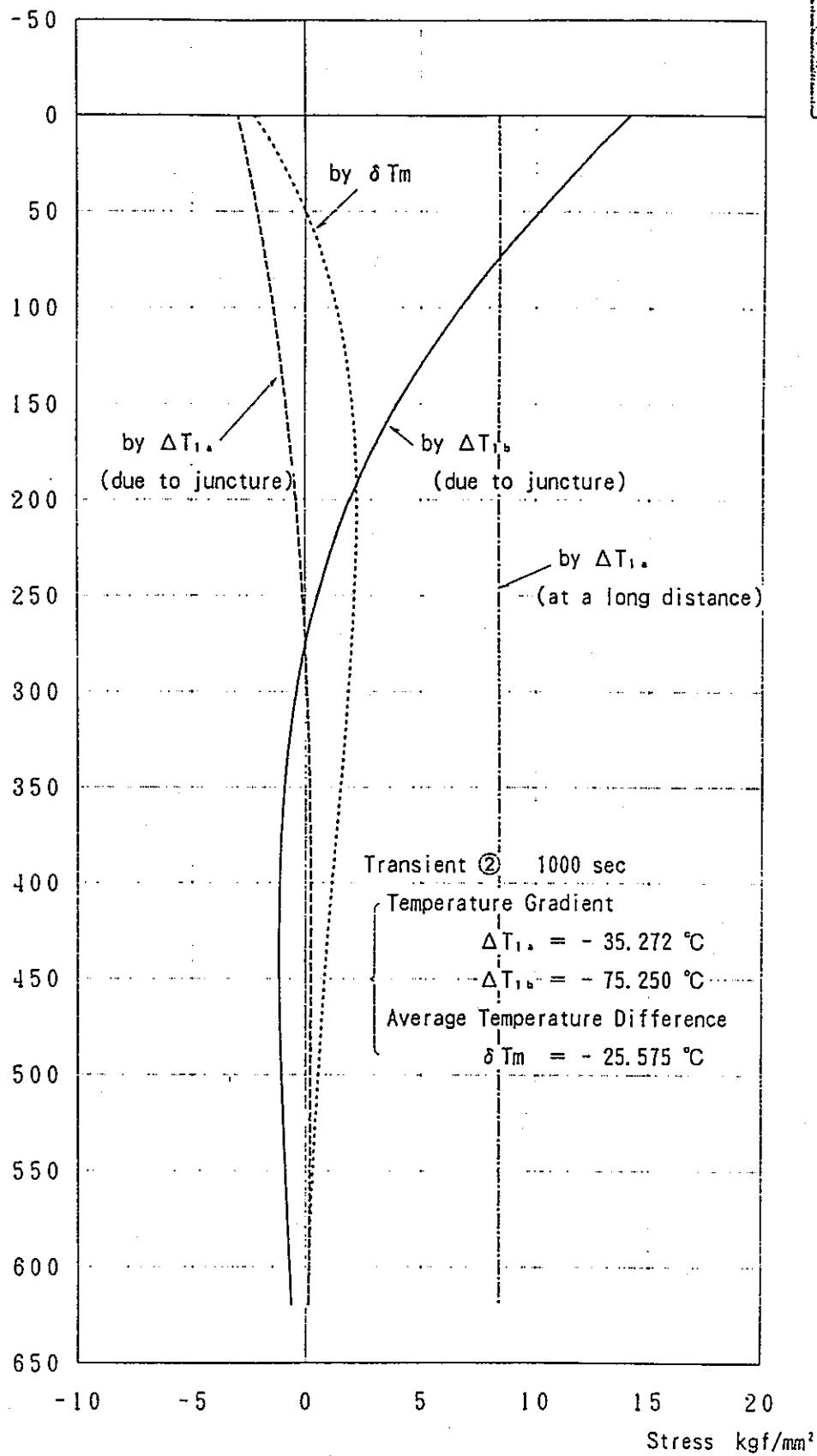


FIG. 4-2 LONGITUDINAL BENDING STRESSES BY THE SHELL SOLUTION case A-1-2

熱応力評価93-1-1-09-04

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

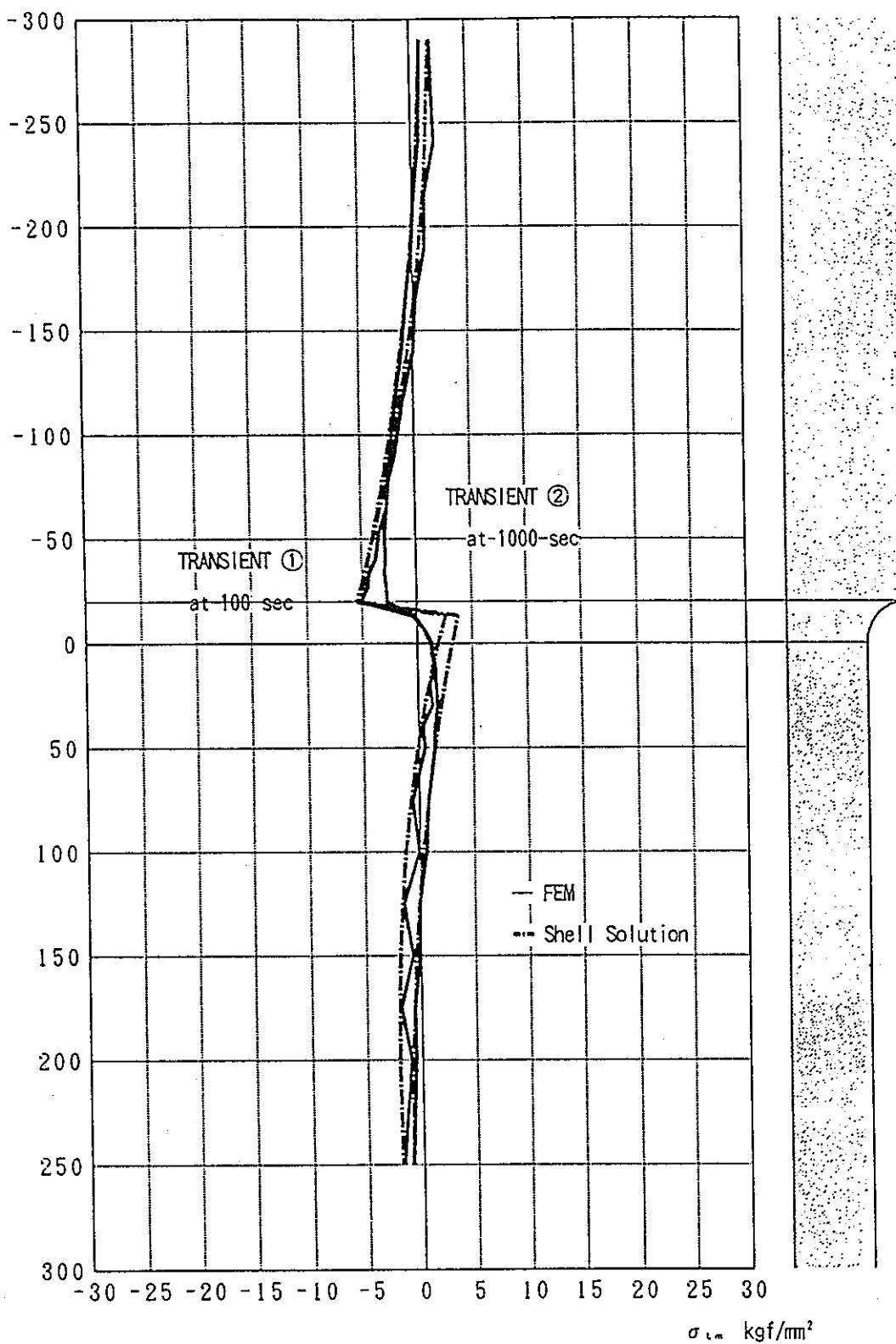


FIG. 5-1 CIRCUMFERENTIAL MEMBRANE STRESS DISTRIBUTIONS case A-1-1 & A-1-2

熱応力評価93-1-1-10-04

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

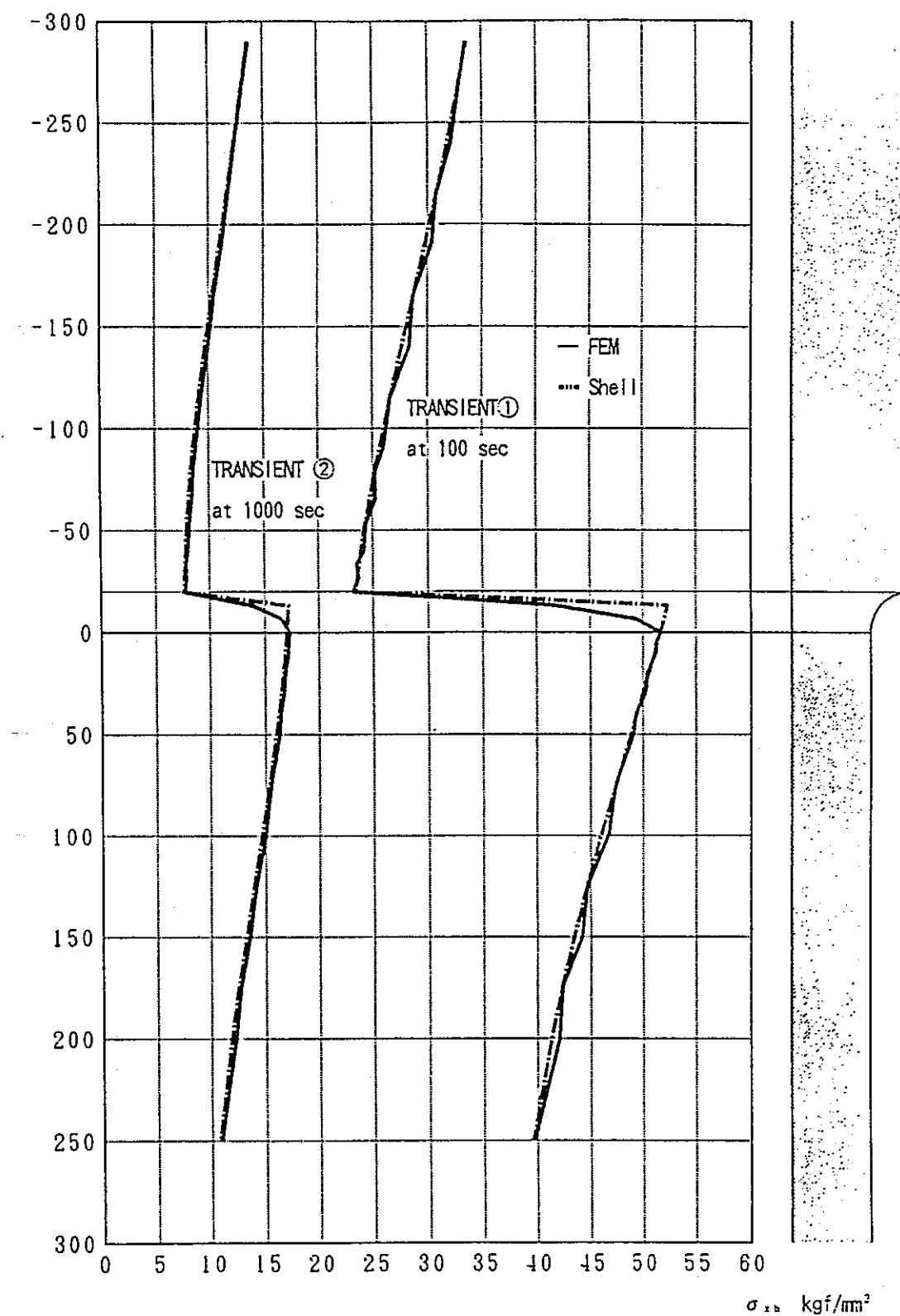


FIG. 5-2 LONGITUDINAL BENDING STRESS SISTRIBUTIONS case A-1-1 & A-1-2

熱応力評価93-1-1-11-05

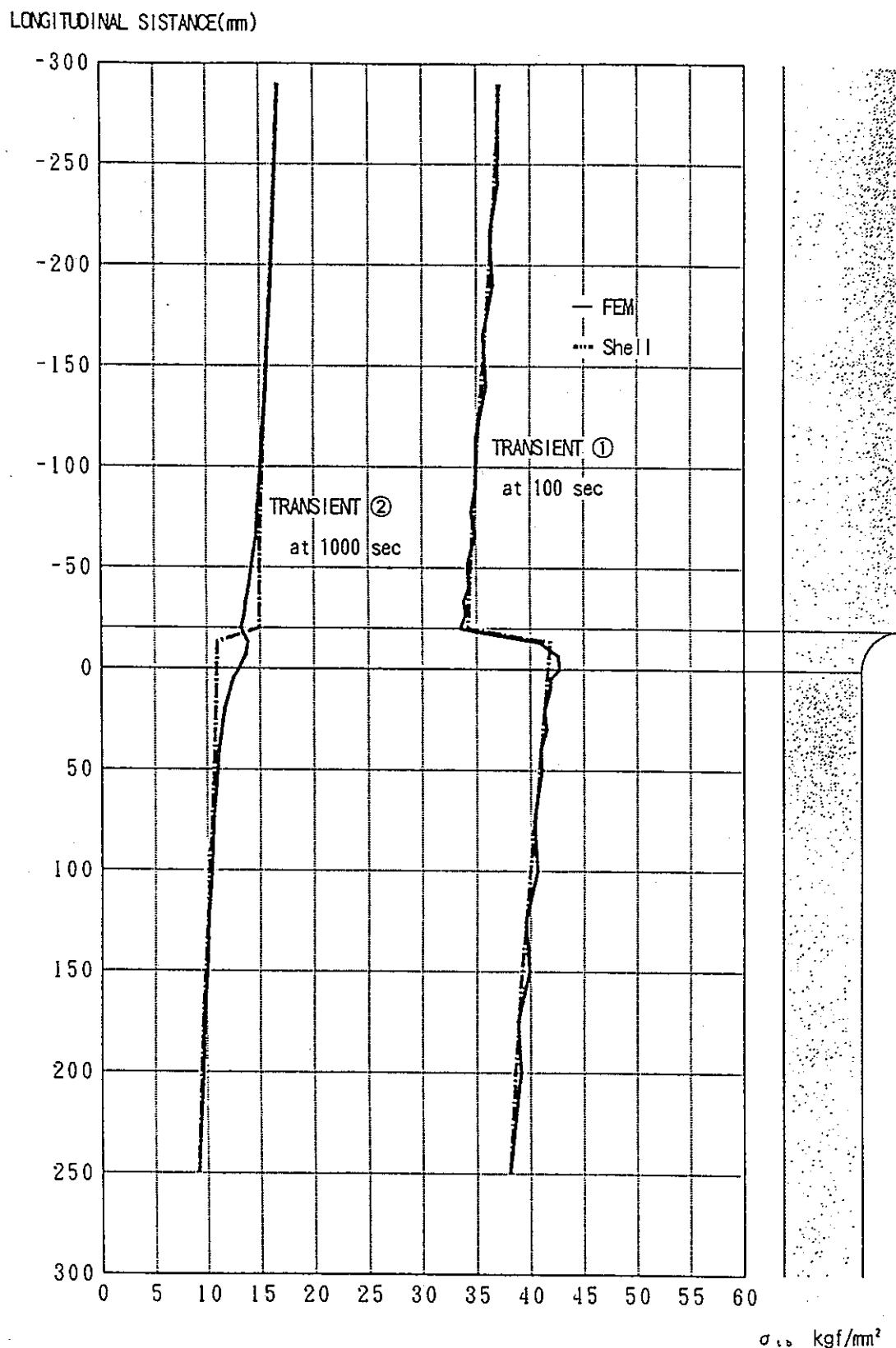


FIG. 5-3 CIRCUMFERENTIAL BENDING STRESS DISTRIBUTIONS case A-1-1 & A-1-2

熱応力評価93-1-1-12-05

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

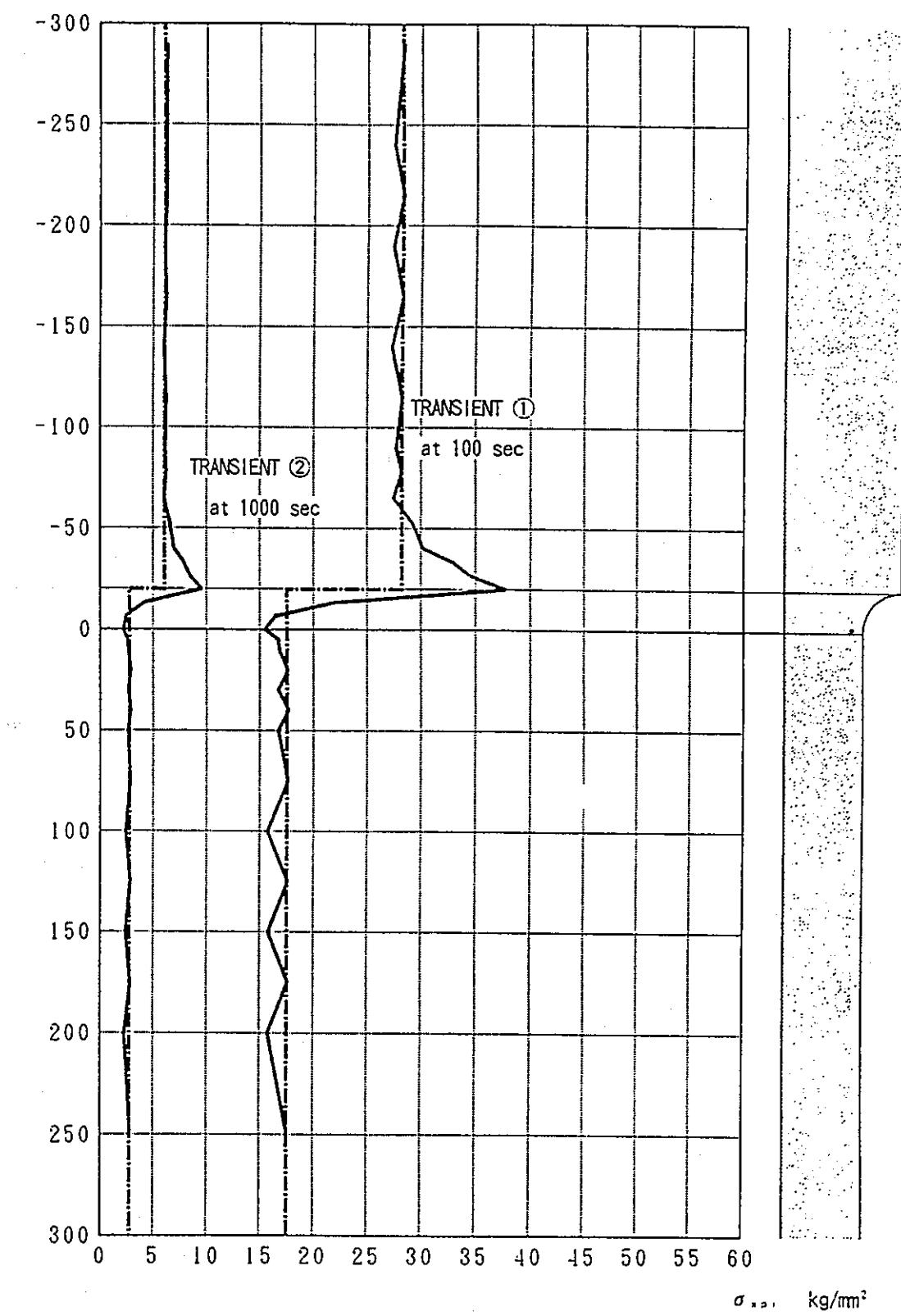


FIG. 5-4 LONGITUDINAL PEAK STRESS DISTRIBUTIONS ON THE INNER SURFACE case A-1-1 & A-1-2

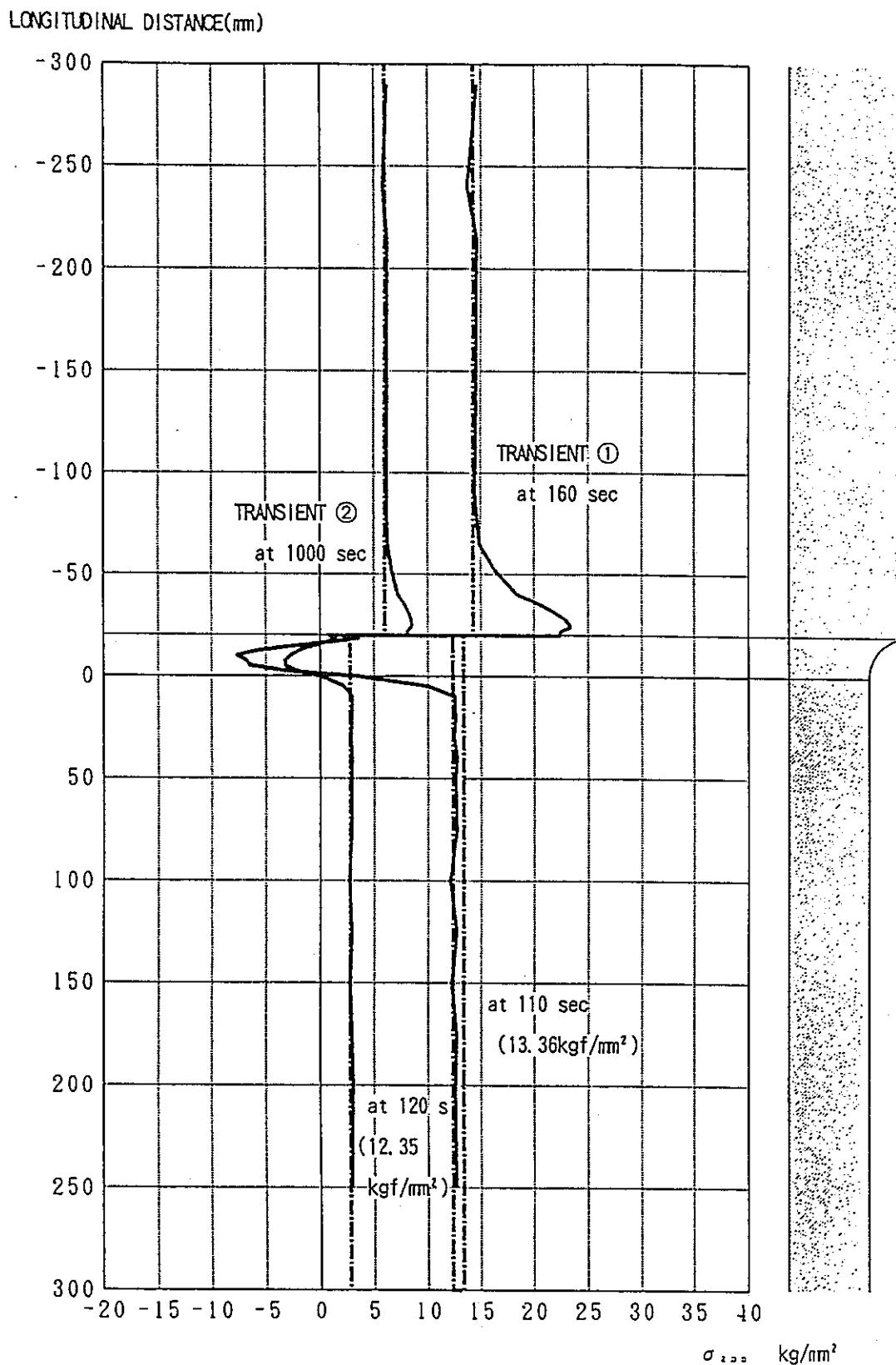


FIG. 5-5 LONGITUDINAL PEAK STRESS DISTRIBUTIONS AT THE OUTER SURFACE case A-1-1 & A-1-2  
評価断面： 表面に鉛直

熱応力評価93-1-1-14-05

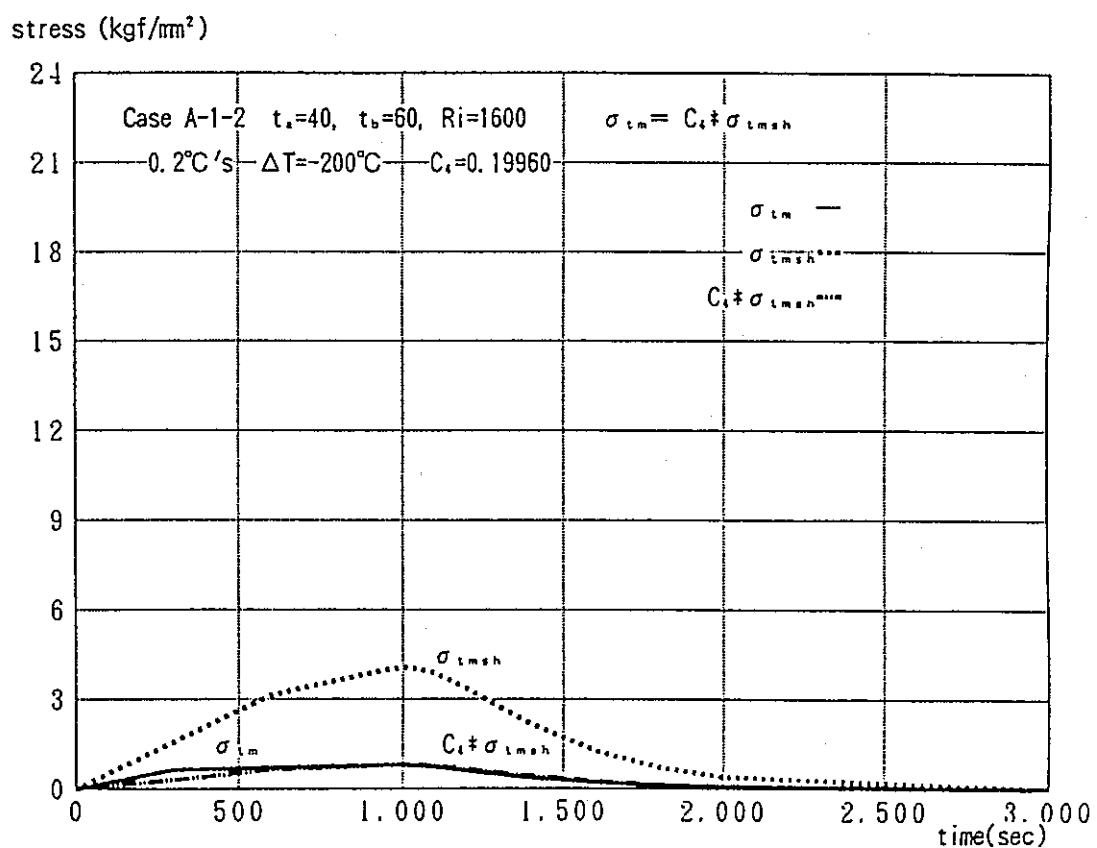
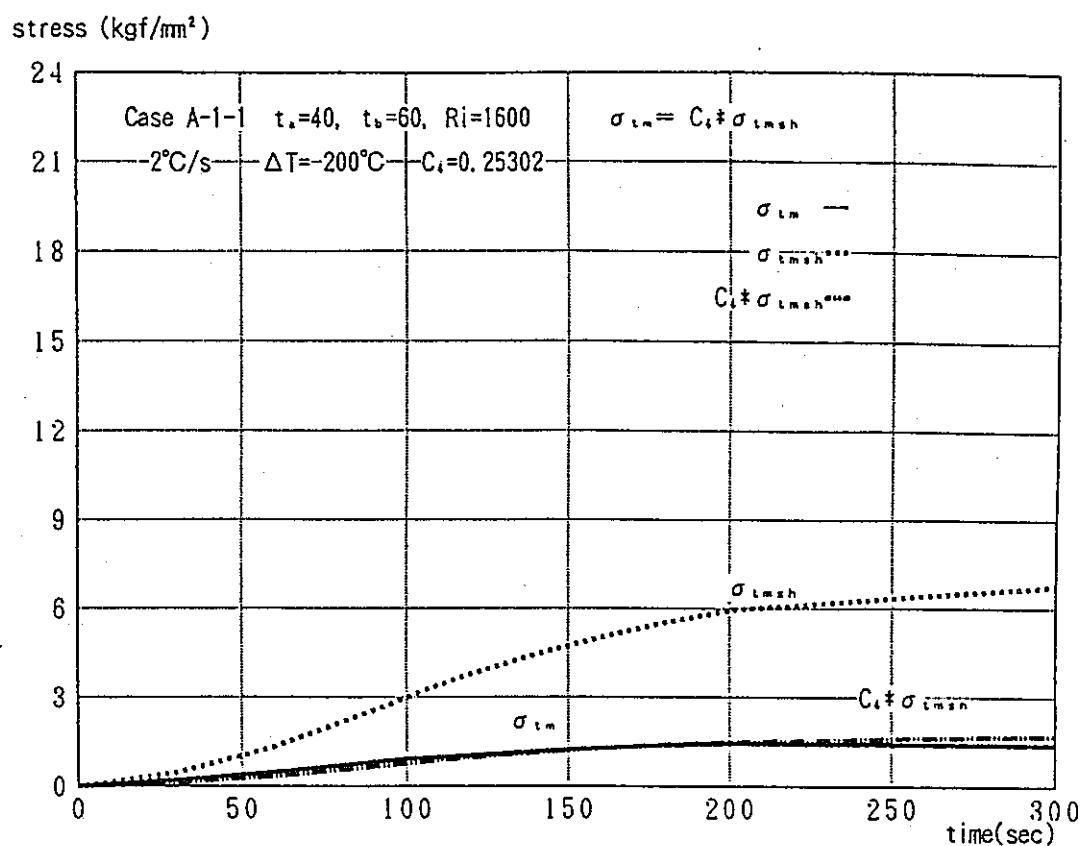


FIG 5-6(1) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE CIRCUMFERENTIAL MEMBRANE STRESS HISTORIES case A-1

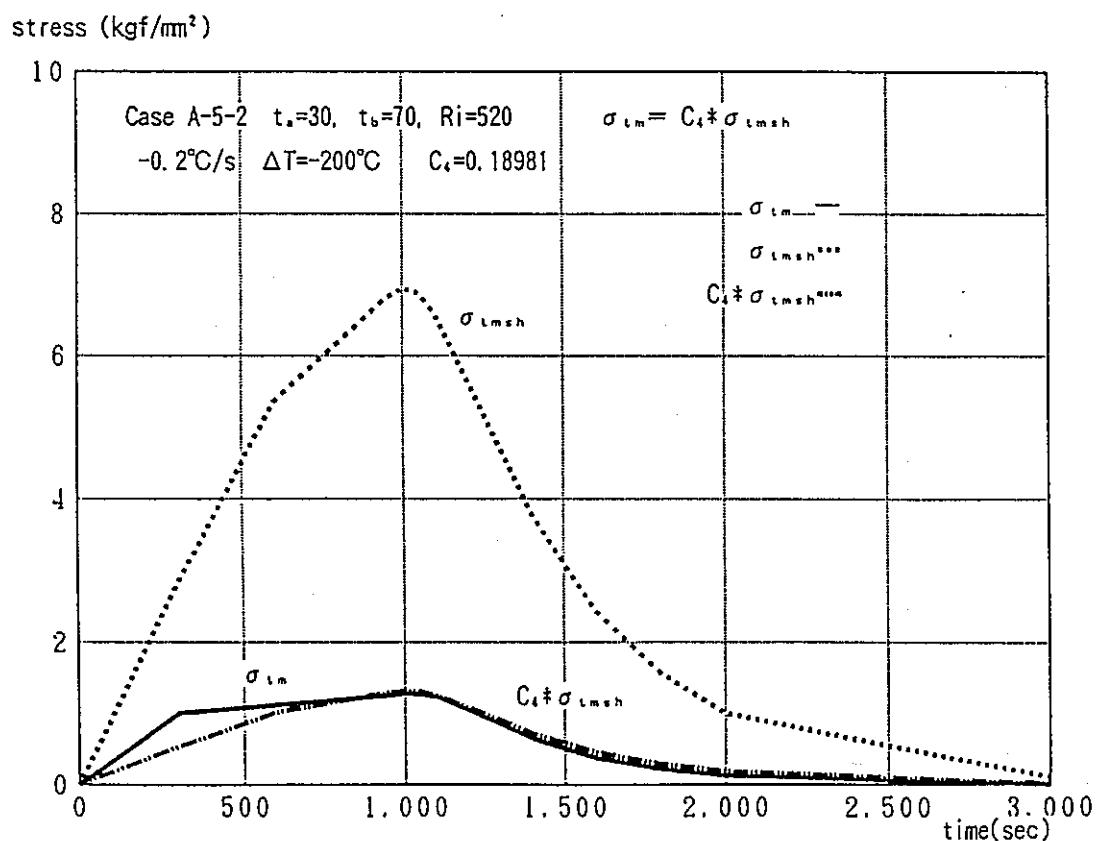
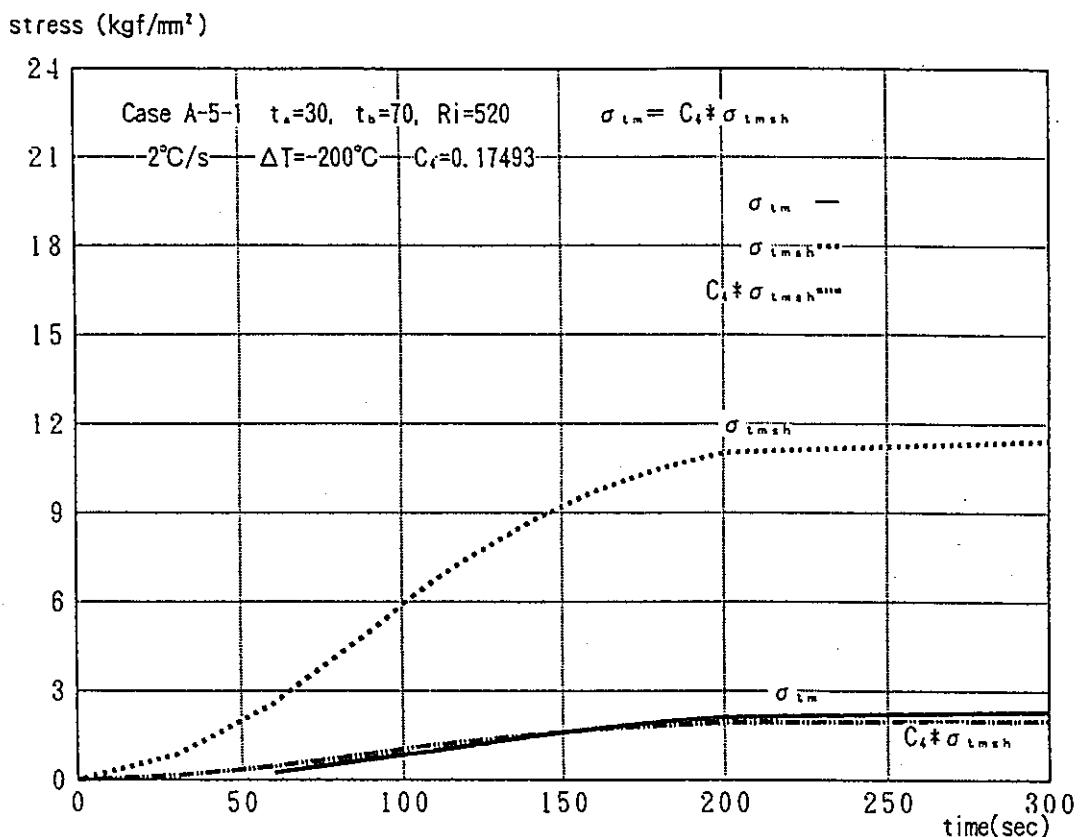


FIG. 5-6(2) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE CIRCUMFERENTIAL MEMBRANE STRESS HISTORIES case A-5

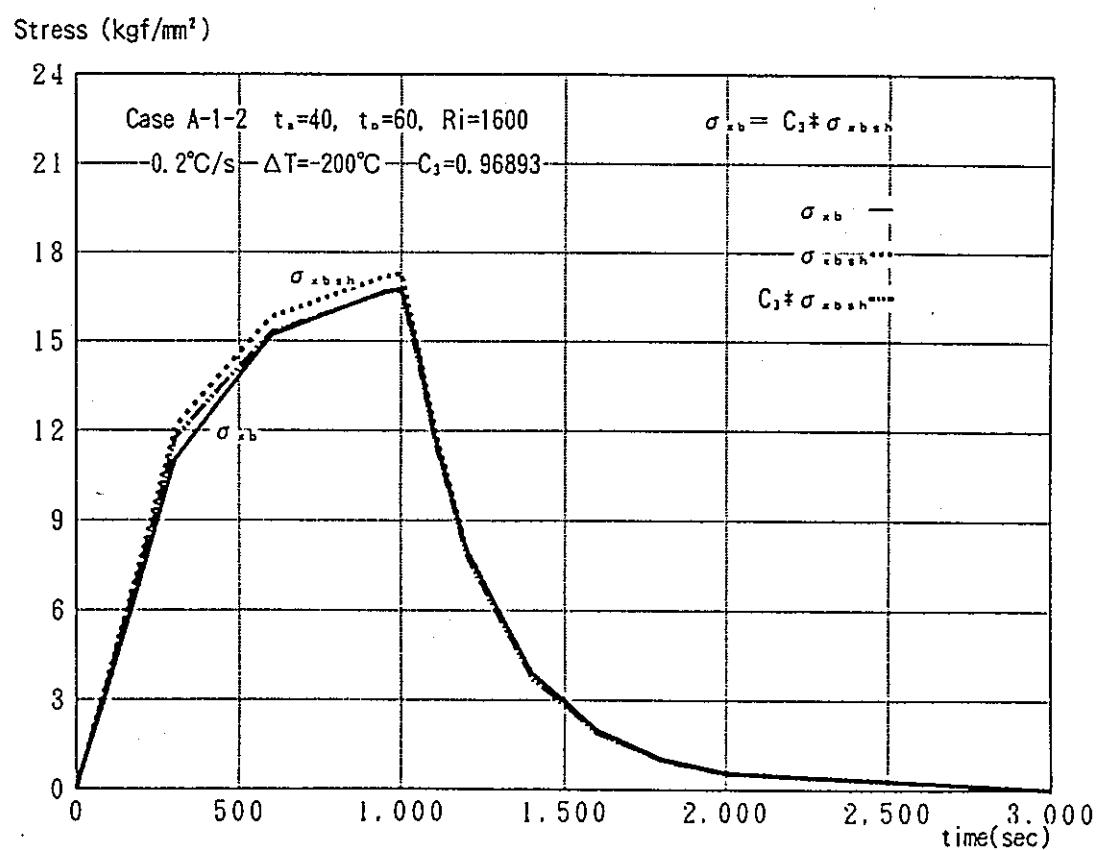
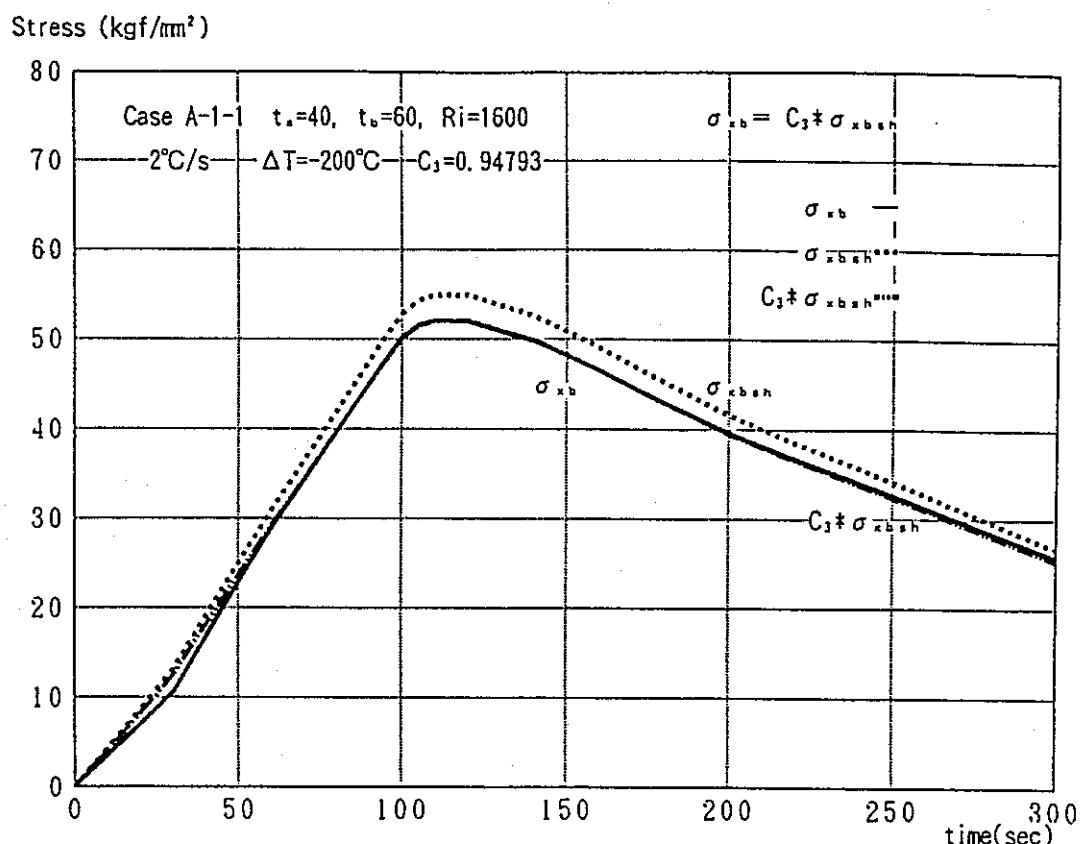


FIG. 5-7(1) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE LONGITUDINAL BENDING STRESS HISTORIES case A-1

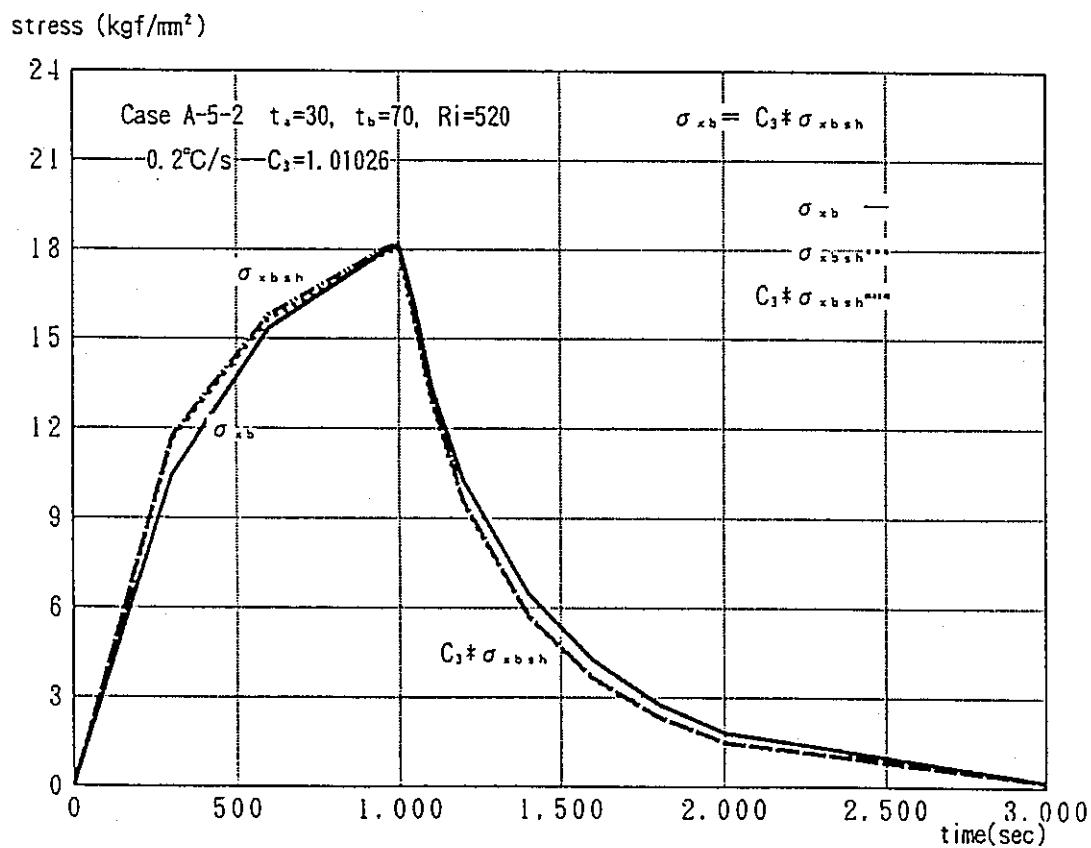
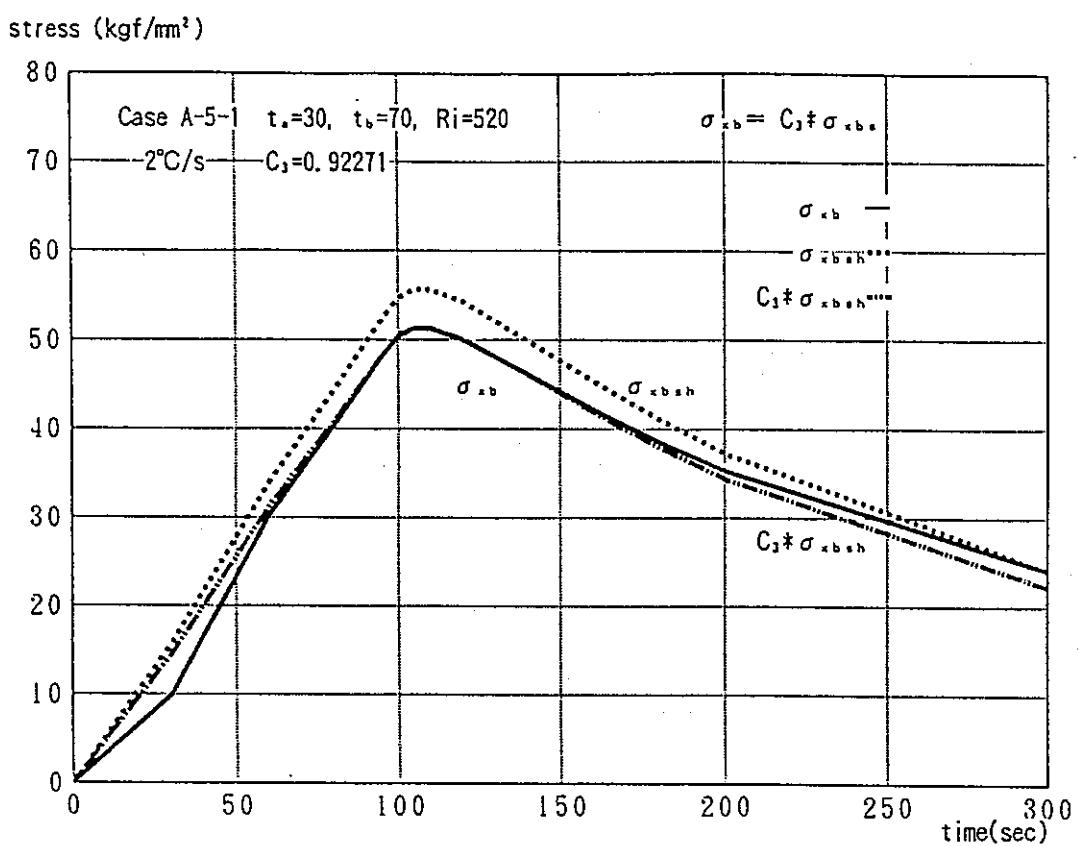


FIG. 5-7(2) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE LONGITUDINAL BENDING STRESS HISTORIES case A-5

熱応力評価93-1-1-1 6 - 0 4

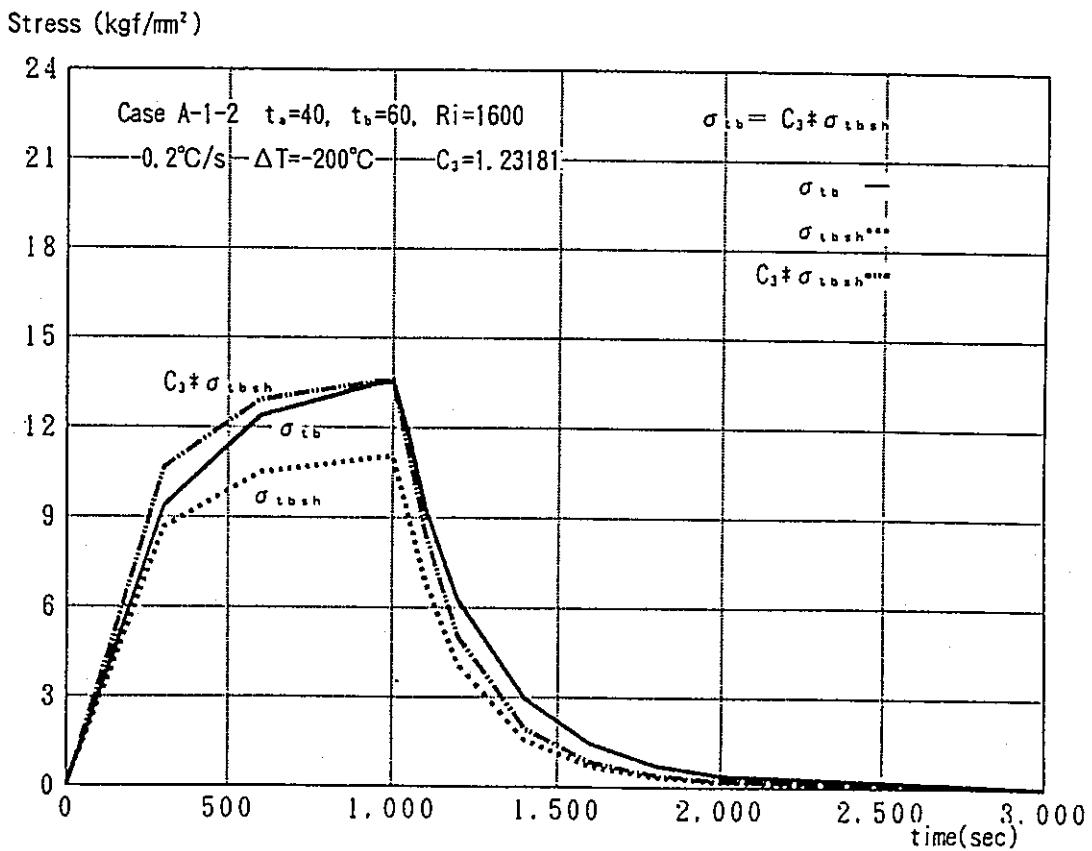
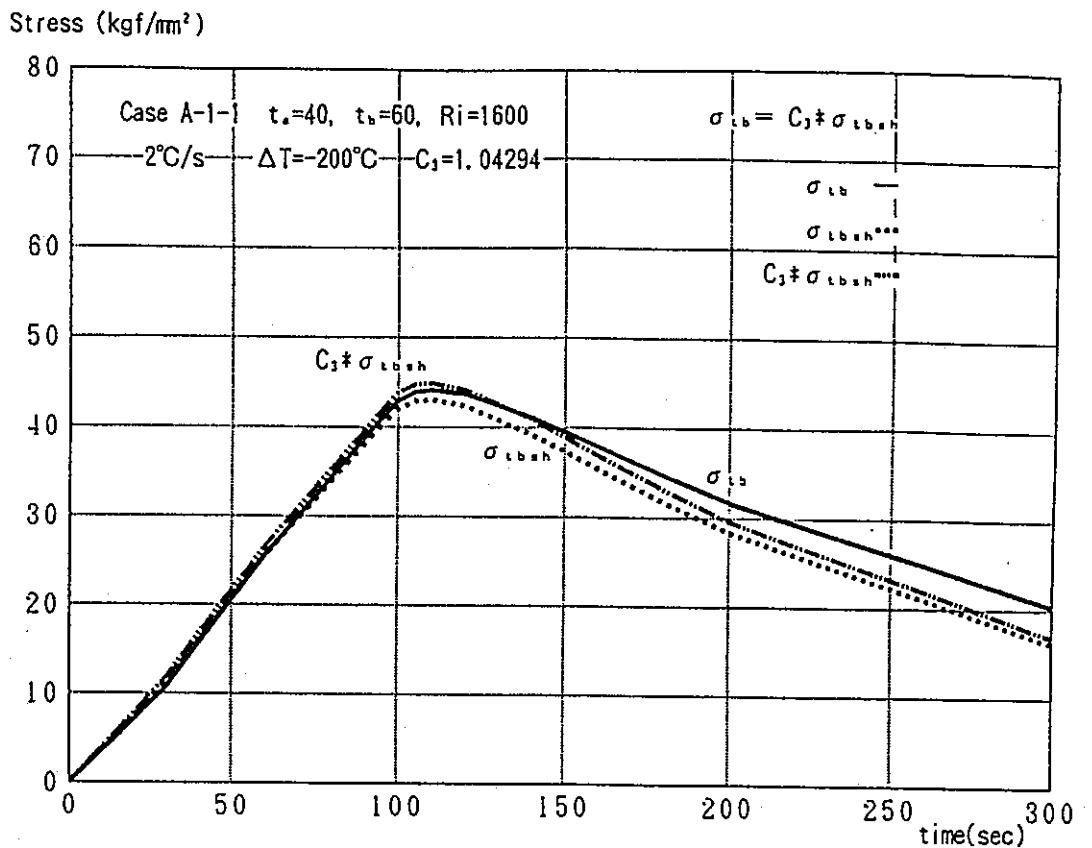


FIG 5-8(1) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE CIRCUMFERENTIAL BENDING STRESS HISTORIES case A-1

熱応力評価93-1-1-17-06

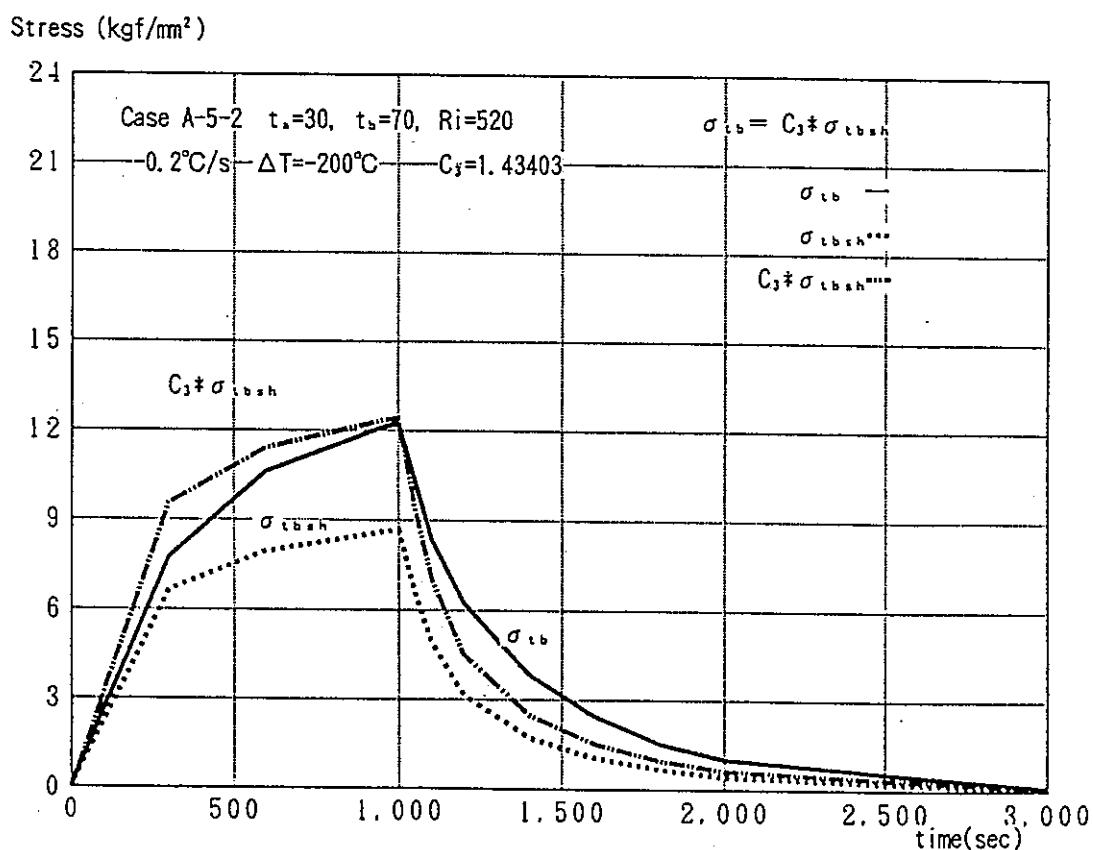
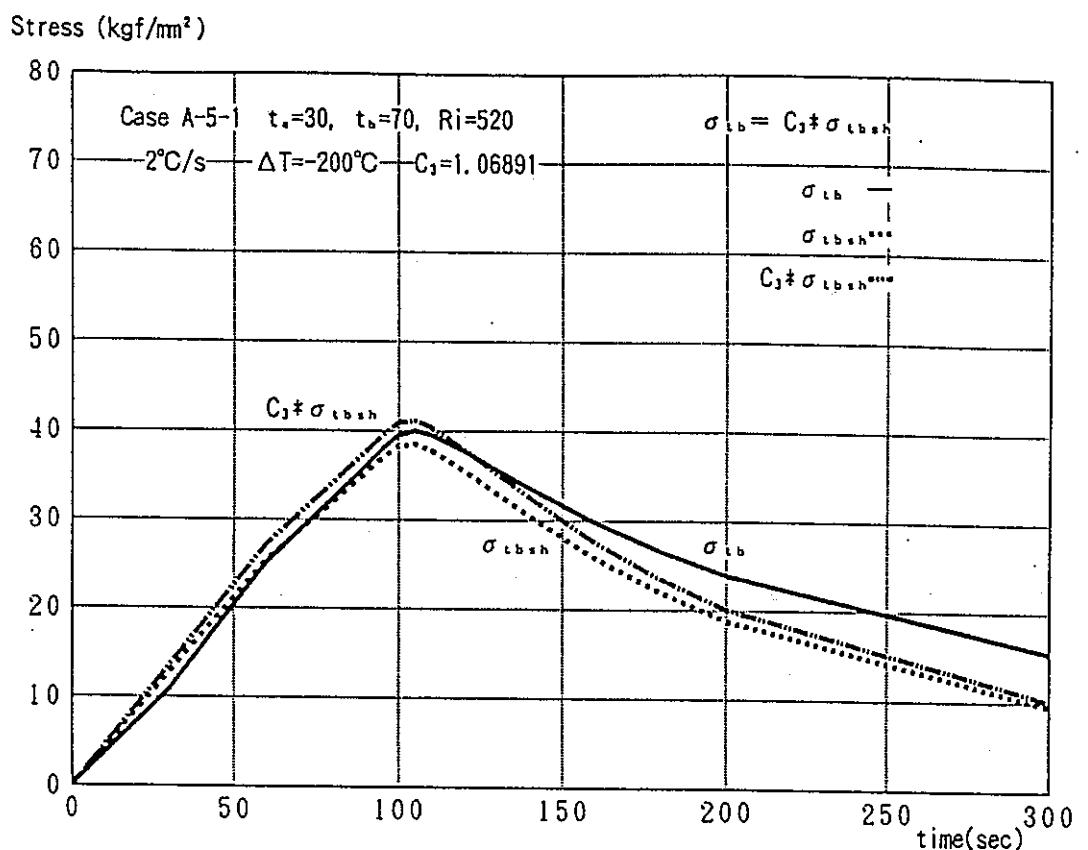


FIG 5-8(2) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE CIRCUMFERENTIAL BENDING STRESS HISTORIES case A-5

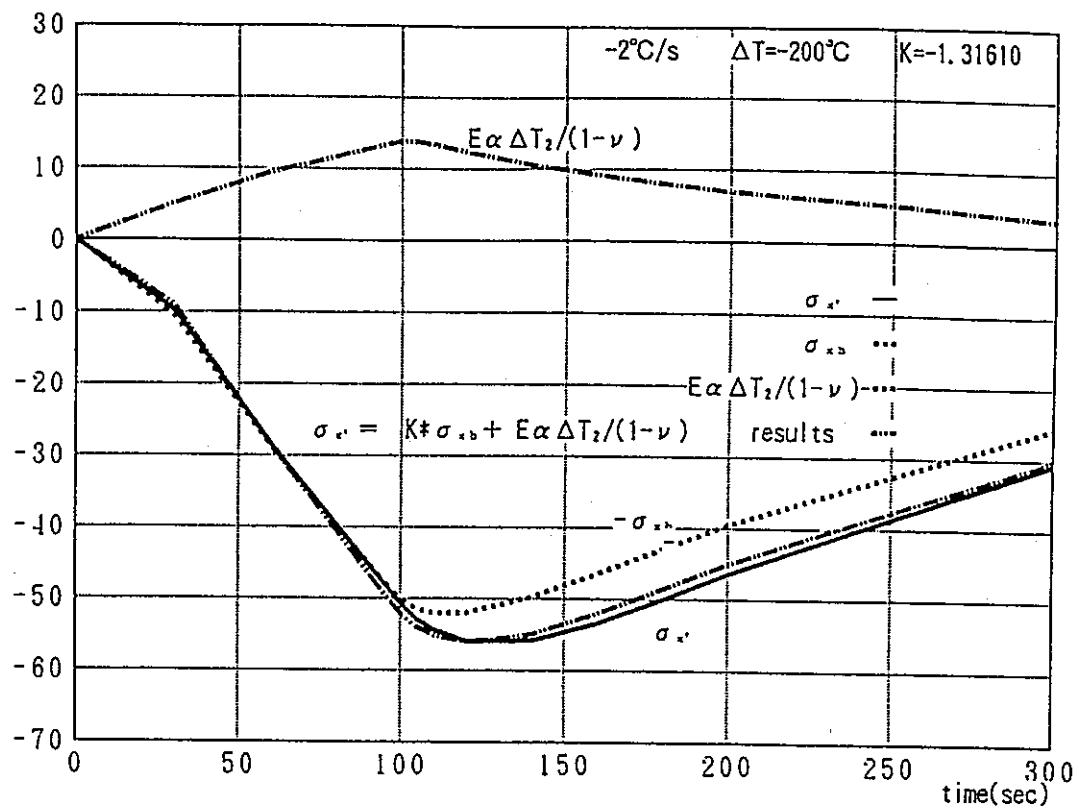
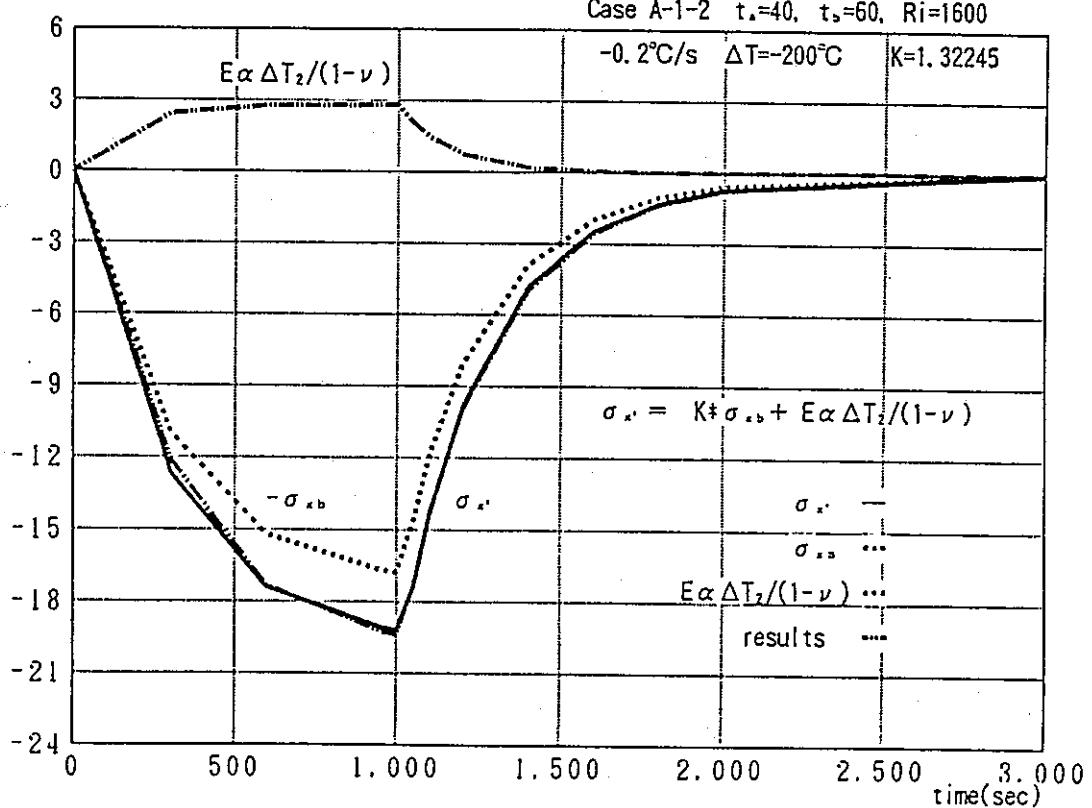
Stress (kgf/mm<sup>2</sup>)Case A-1-1  $t_a=40$ ,  $t_b=60$ ,  $Ri=1600$ Stress (kgf/mm<sup>2</sup>)Case A-1-2  $t_a=40$ ,  $t_b=60$ ,  $Ri=1600$ 

FIG. 6-1(1) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE LONGITUDINAL STRESSES ON THE OUTER SURFACE case A-1

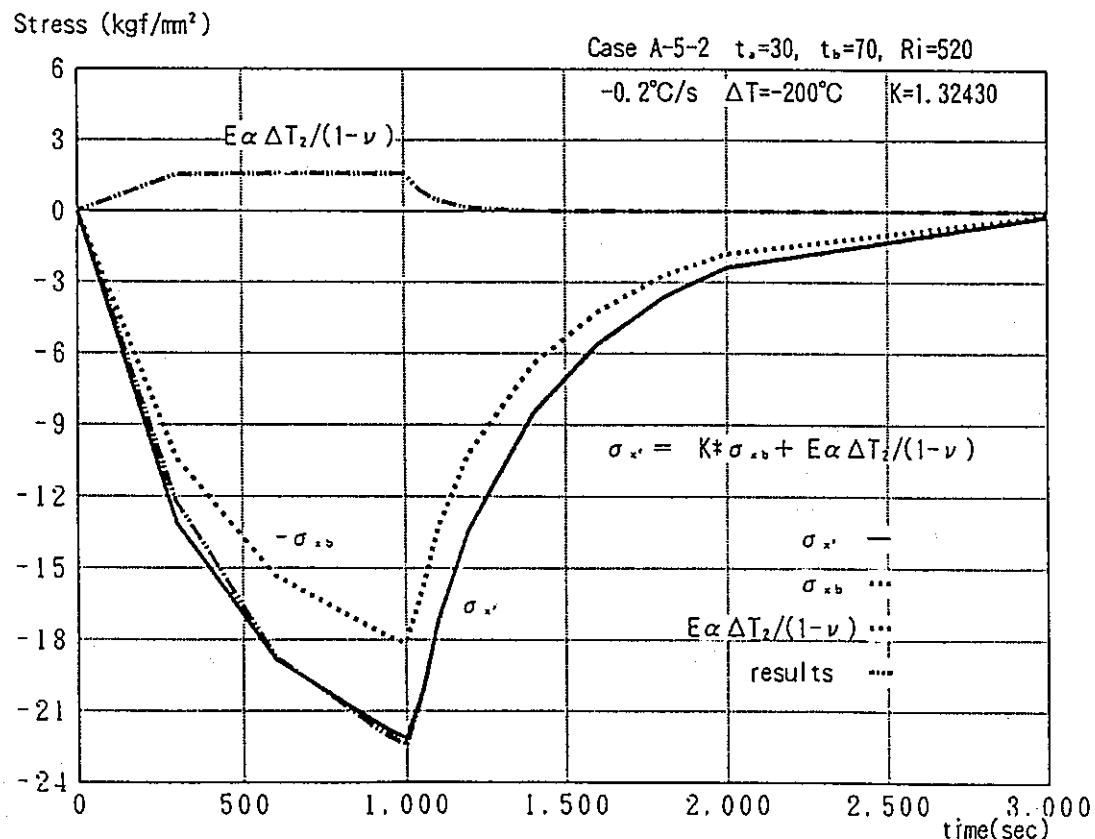
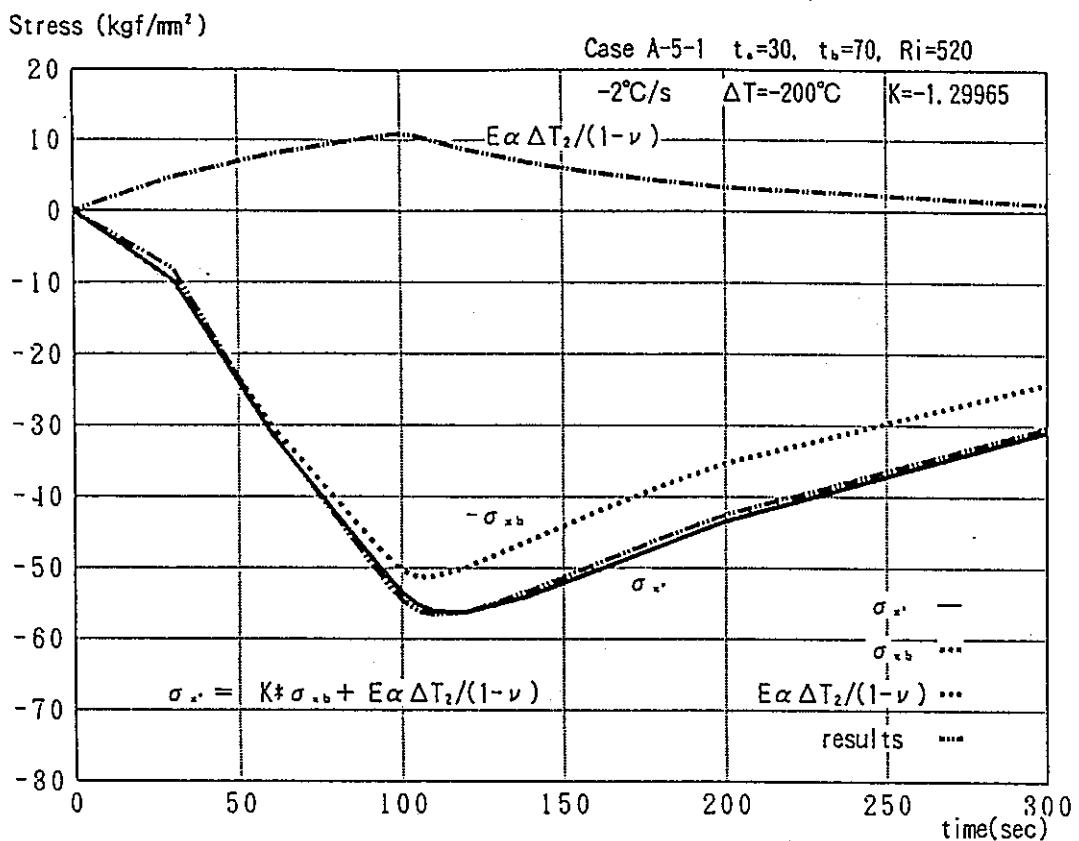


FIG. 6-1(2) REGRESSIVE ANALYSIS OF THE LONGITUDINAL STRESSES ON THE OUTER SURFACE case A-5

## Appendix-A Temperature Distributions by the detailed FEM Analysis and the Effects on the Thermal Stresses of the Longitudinal Heat Conduction

Representative examples of comparison of the temperature distributions between the detailed analysis results and the assumption to obtain the shell solution or the one-dimentional heat conduction analysis results are shown in Fig.A-1 toFig.A-4. It can be said that;

- (1) They coincide well at a sufficient distance from the junction.
- (2) Both the wall-averaged temperature and the equivalent linear temperature gradient through the wall come close near the junction.
- (3) The non-linear temperature gradient through the wall is almost not affected by the junction both on the inner surface and on the outer surface.

The contiguity of the wall-averaged temperature and the equivalent linear temperature gradient is caused by the longitudinal heat conduction in the neighbourhood of the junction. Here its effects are examined by calculation of the thermal stresses on a uniform cylinder which has longitudinal temperature distribution.

Fig.A-5 shows the circumferential membrane stress( $\sigma_{1m}$ ) distributions and the longitudinal bending stress( $\sigma_{1b}$ ) distributions when the wall-averaged temperature changes in a specific length  $\Delta l$ , and Fig.A-6 shows the longitudinal and circumferential bending stress( $\sigma_{2b}$  and  $\sigma_{3b}$ ) distributions when the linear temperature gradient through thewall change in a specific length  $\Delta l$ .

The stresses are normalized so that  $\sigma_{1m}$  at  $x=0$  becomes unity in Fig.A-5 andso that  $\sigma_{2b}$  and  $\sigma_{3b}$  at a great distance become unity in Fig.A-6.

It can be found that:

- (a) The circumferential membrane stress ( $\sigma_{1m}$ ) decreases significantly as the length  $\Delta l$  increases. It decreases more significantly within the length of  $\Delta l$ .
- (b) The longitudinal bending stress ( $\sigma_{1b}$ ) is almost independent on the length  $\Delta l$ .
- (c) The circumferential bending stress( $\sigma_{2b}$ ) increases where the  $\Delta T_1$  is smaller.

The above characteristics correspond quite well to the behaviors of each stress component at the junction of two cylinders, and it should be pointed out that the shell solution will be able to be successfully applied as the basis to compose the simplified method with understanding of these different effects of the longitudinal heat conduction near the discontinuities.

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

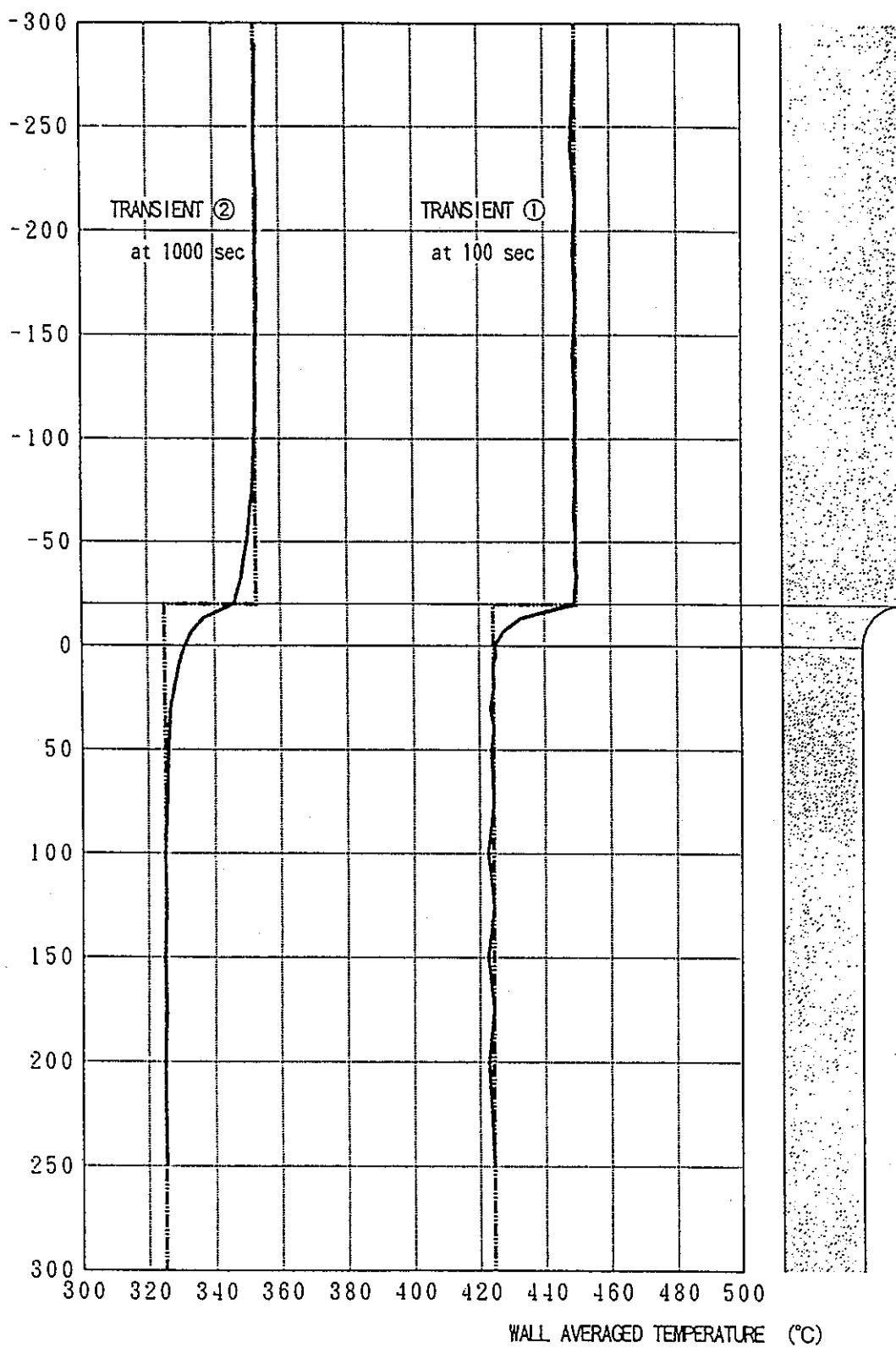


FIG. A1-1 AVERAGE TEMPERATURE DISTRIBUTIONS case A-1-1 & A-1-2

熱応力評価93-1-1-2 0 - 0 5

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

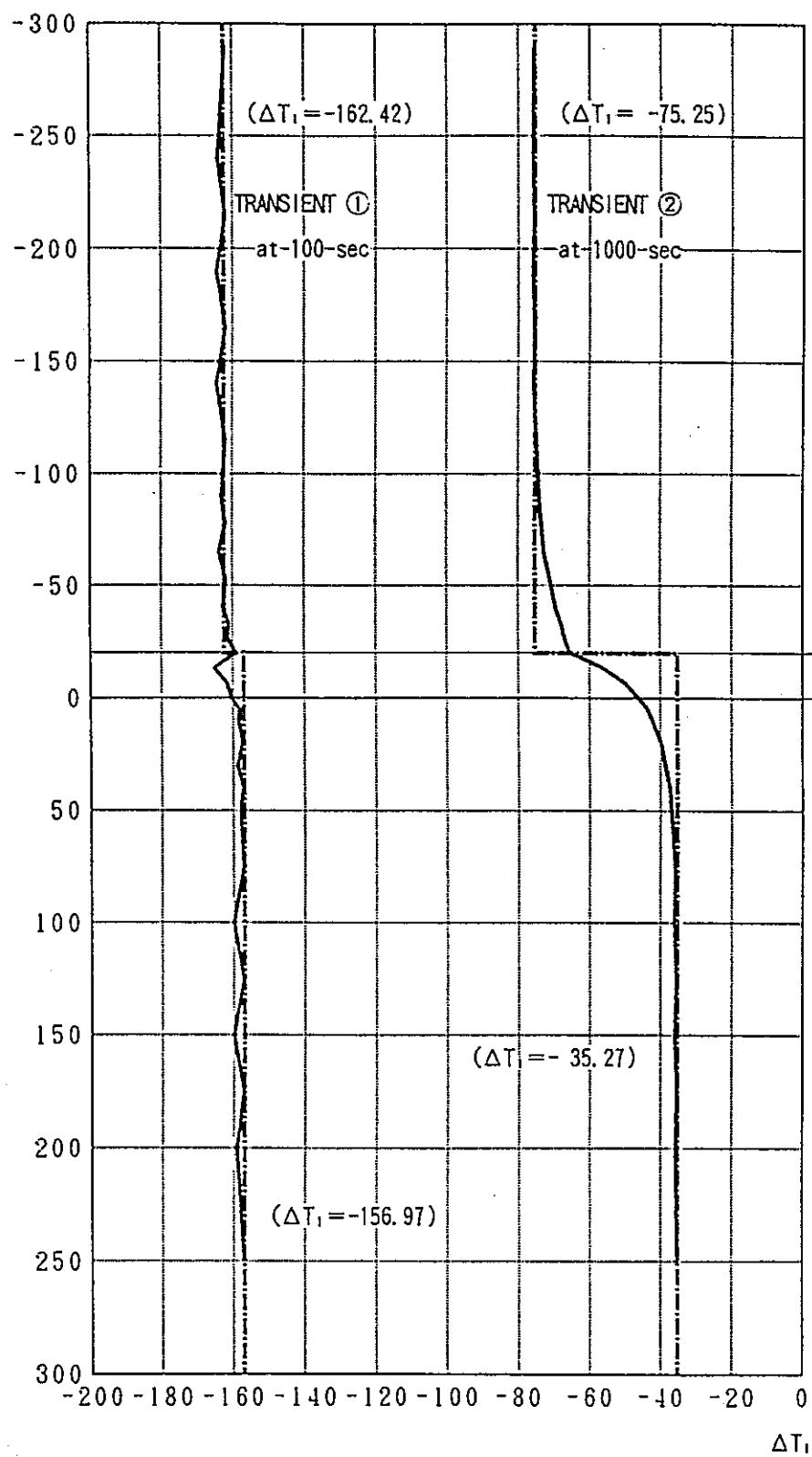


FIG A1-2 EQUIVALENT LINEAR TEMPERATURE GRADIENT DISTRIBUTION case A-1-1 & A-1-2

熱応力評価93-1-1-2 | -0 7

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

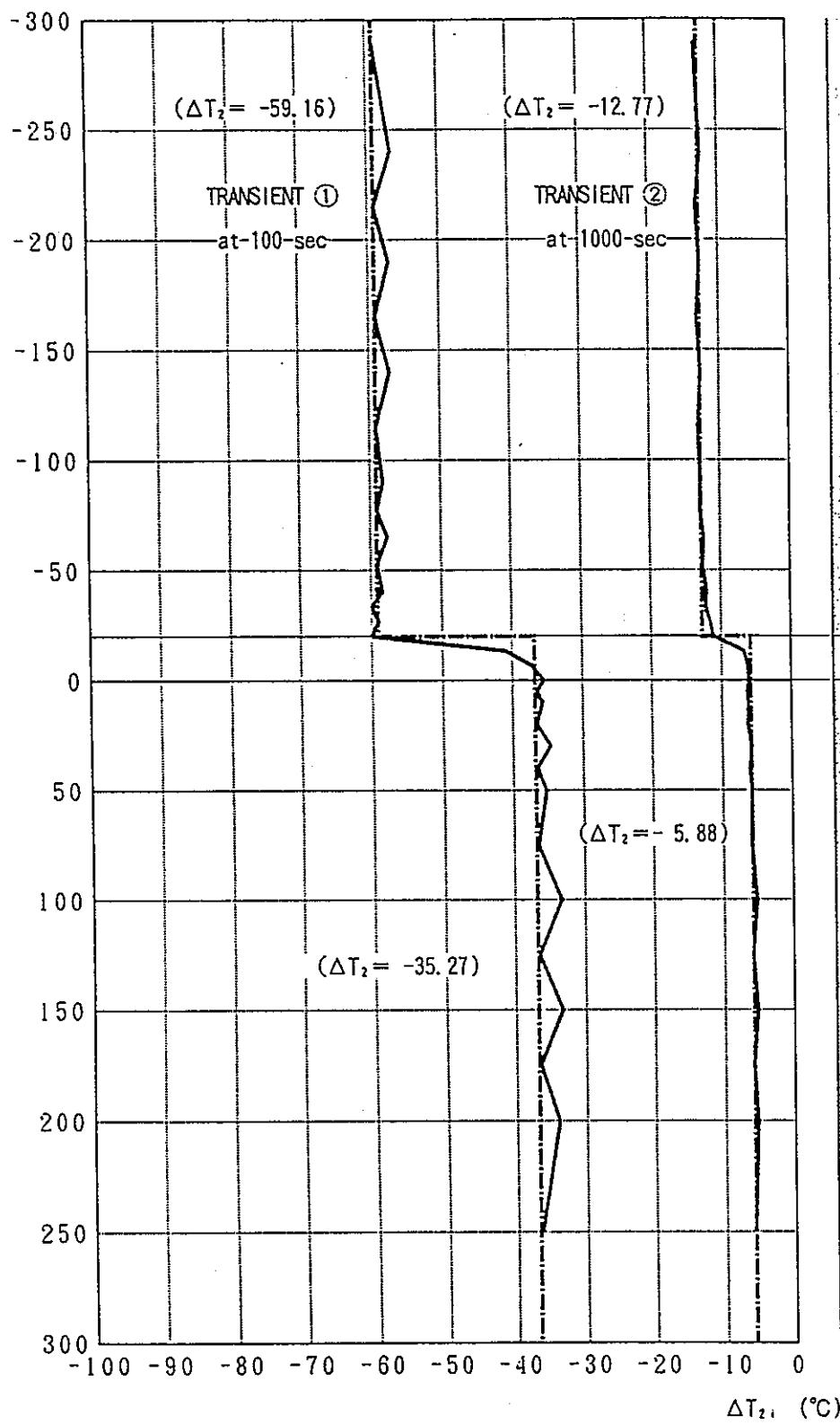


FIG. A1-3 NONLINEAR TEMPERATURE GRADIENT DISTRIBUTION AT THE INNER SURFACE case A-1

LONGITUDINAL DISTANCE(mm)

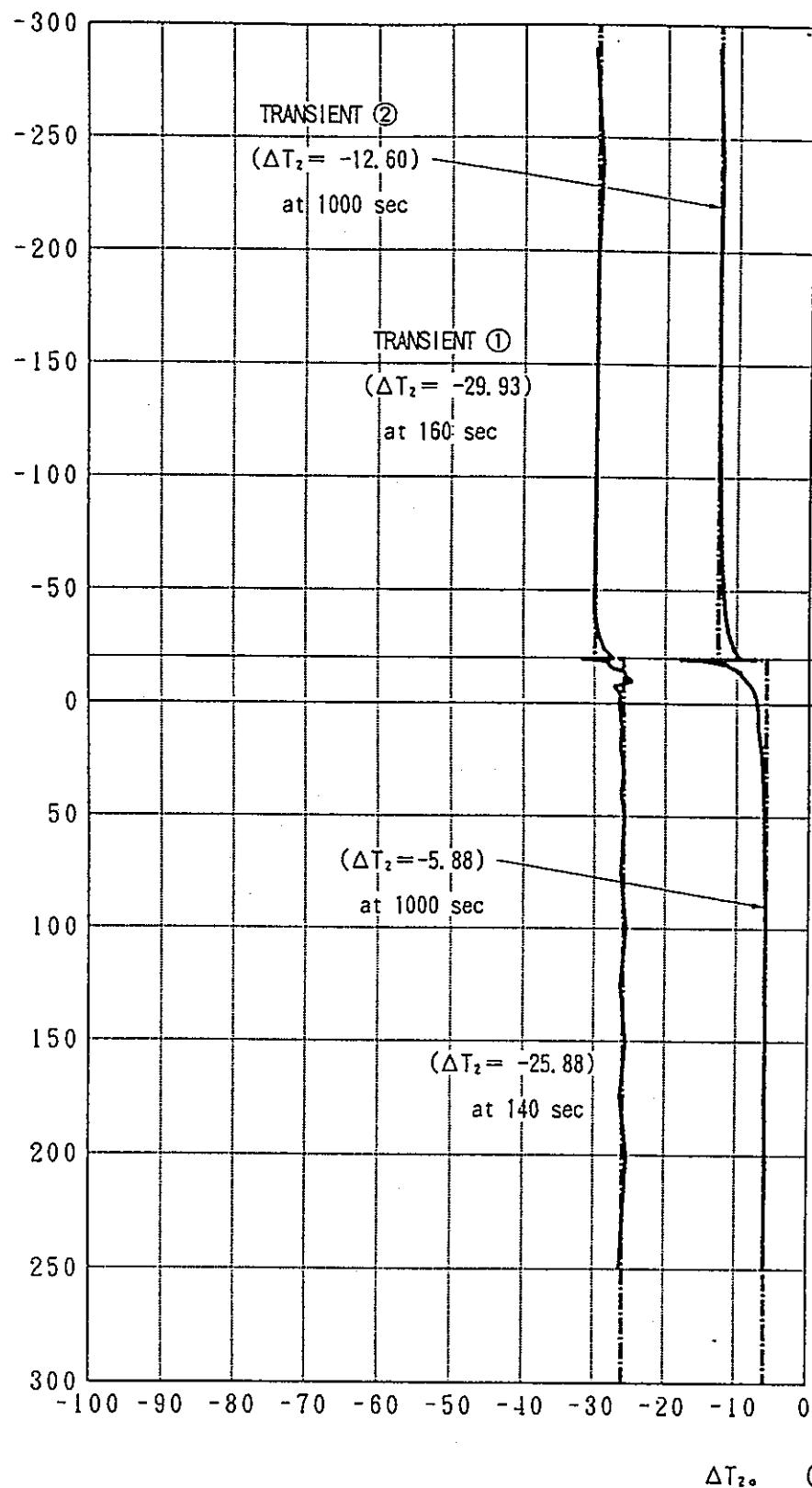


FIG. A1-4 NONLINEAR TEMPERATURE GRADIENT DISTRIBUTIONS ON THE OUTER SURFACE case A-1  
(Note: The evaluation section perpendicular to the surface was assumed)

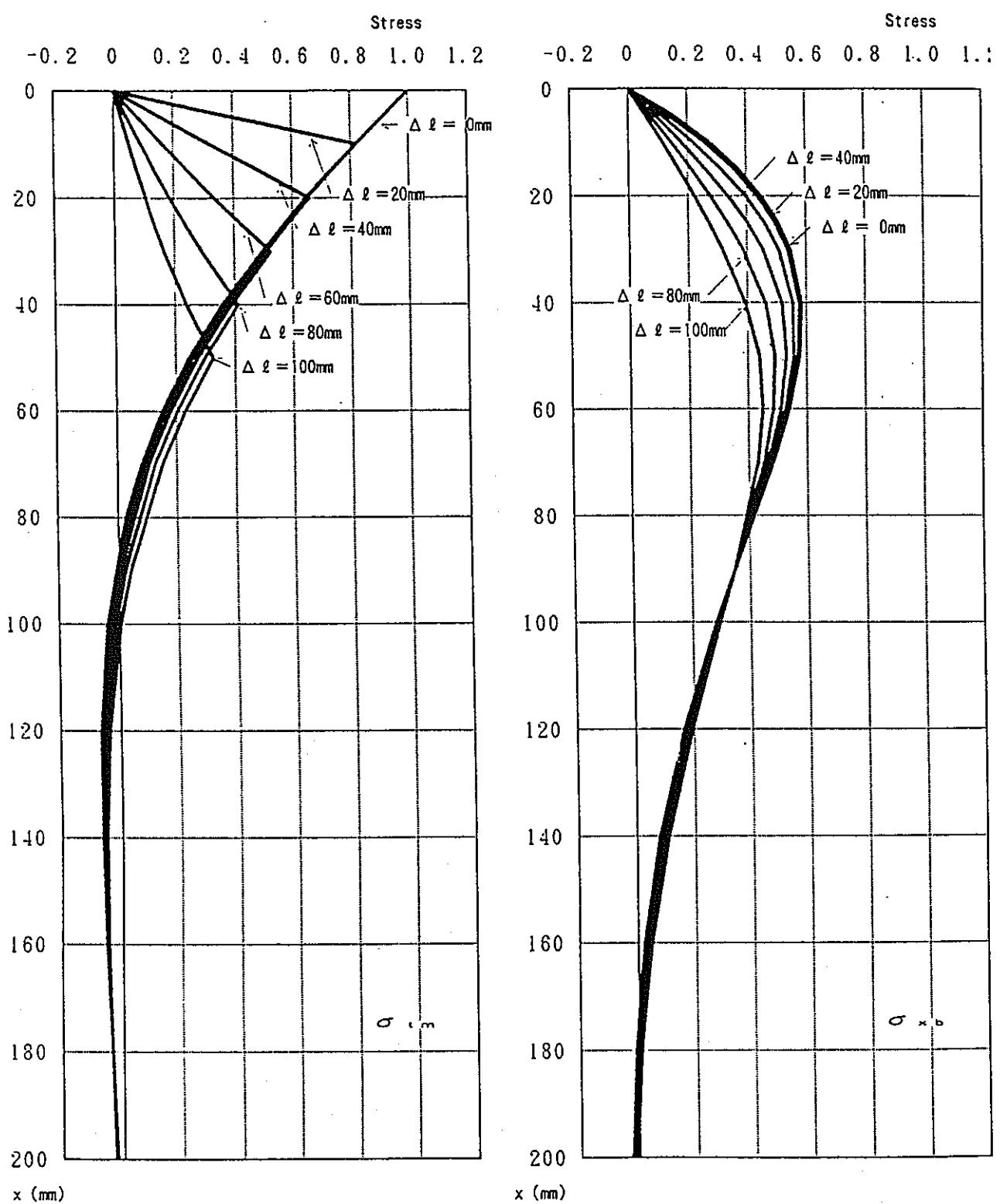


FIG. A1-5 THERMAL STRESSES DUE TO THE AVERAGE TEMPERATURE DIFFERENCE  
AS A FUNCTION OF THE TRANSITION LENGTH ( $D=1000\text{mm}$  ,  $t=10\text{mm}$  ,  $\nu=0.295$ )

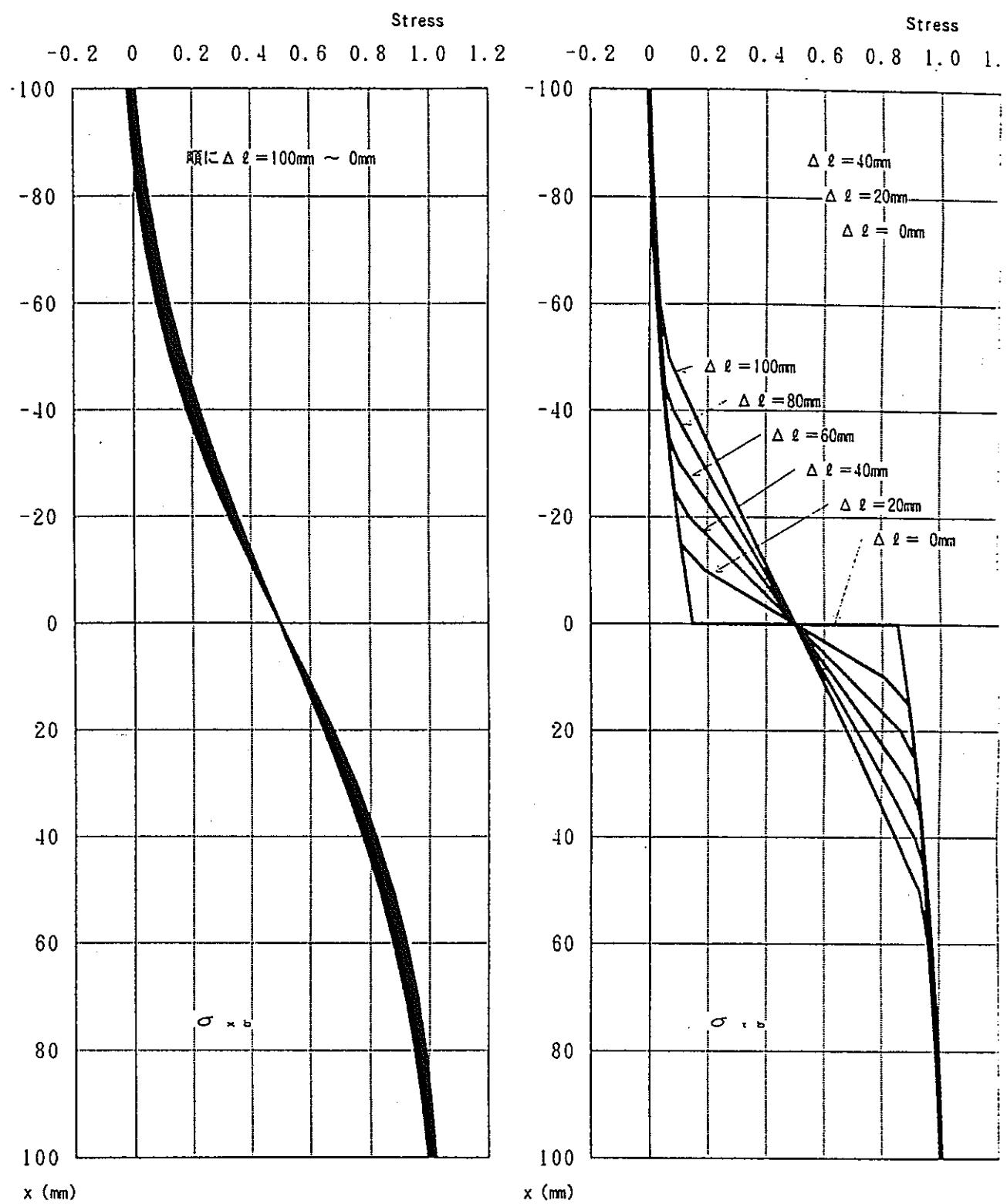


FIG. A1-6 THERMAL STRESSES DUE TO DIFFERENCE IN THE TEMPERATURE GRADIENT THROUGH THE WALL  
AS A FUNCTION OF THE TRANSITION LENGTH      ( $D=1000\text{mm}$ ,  $t=10\text{mm}$ ,  $\nu=0.295$ )

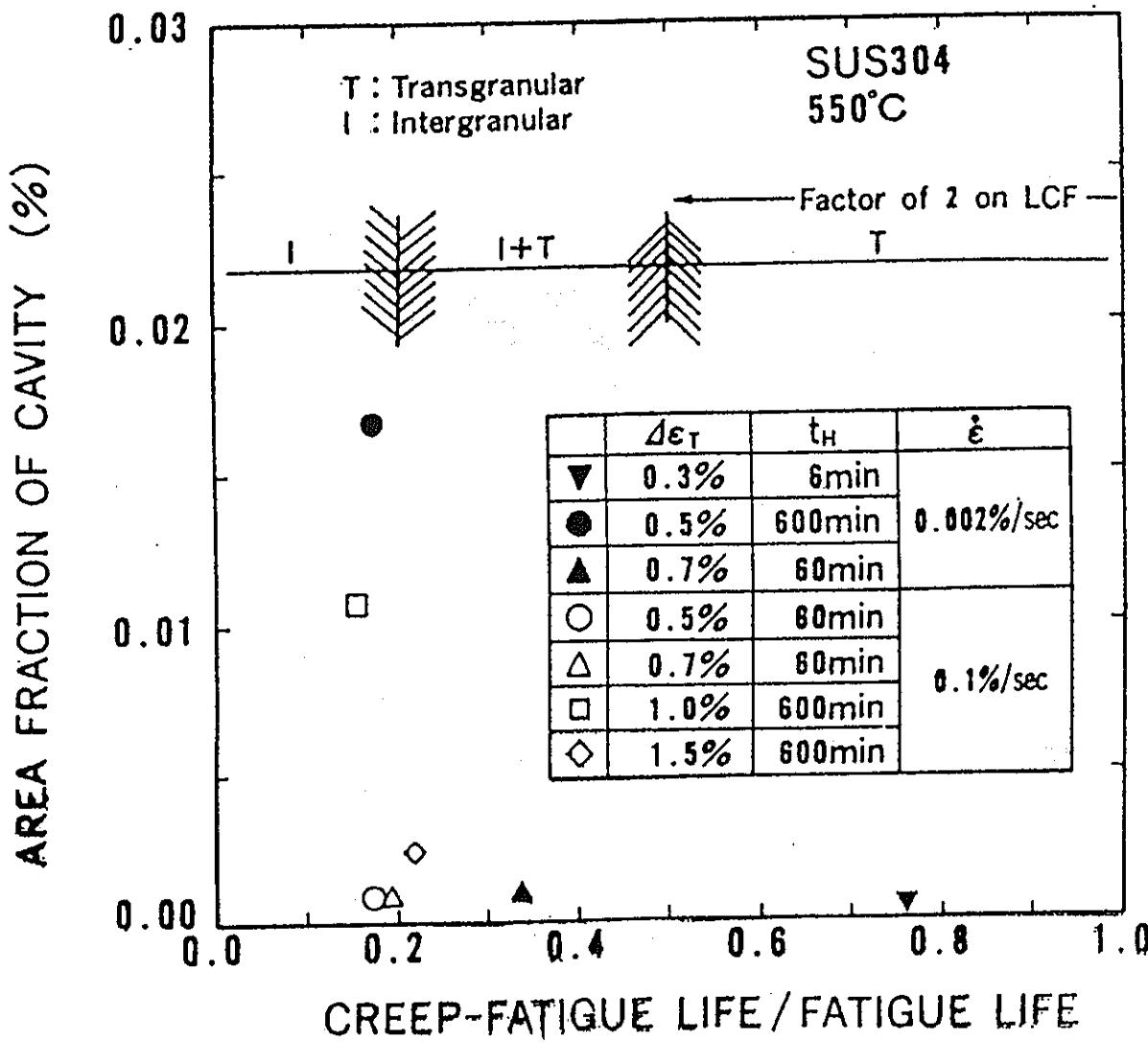
フロンティア研究計画

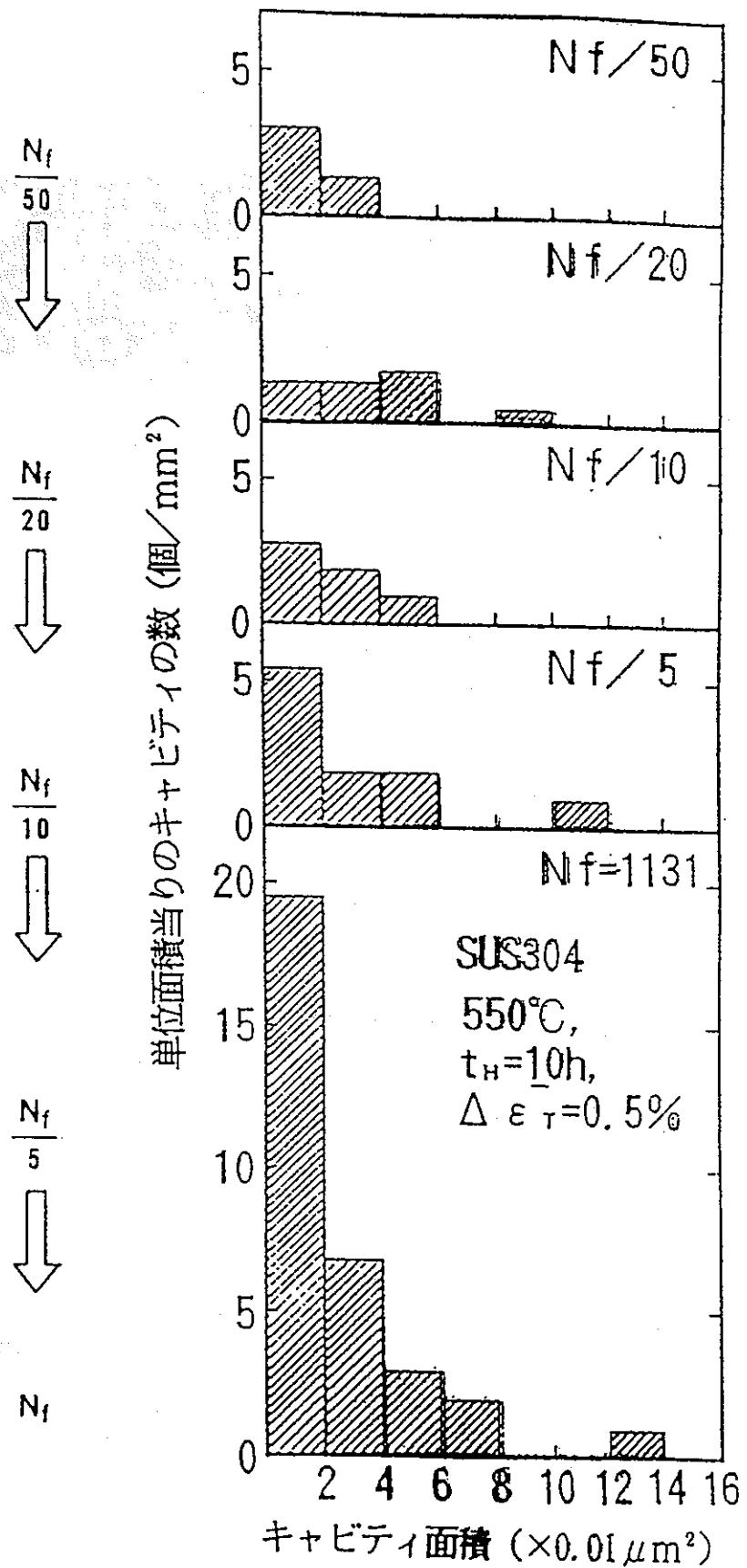
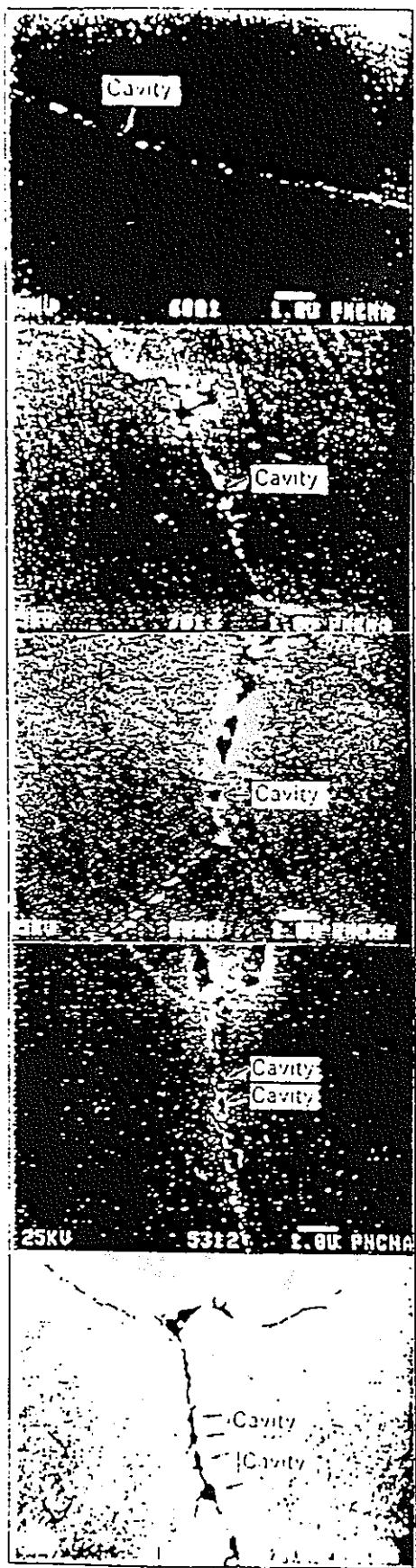
クリープ疲労損傷過程のコンピュータ  
シミュレーション技術の開発

[実施予定期間：平成6年4月  
～平成11年3月]

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター  
機器構造開発部  
材料開発室

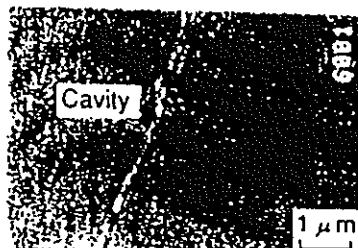
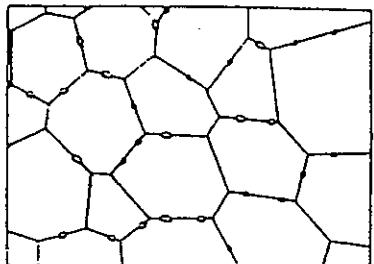
和田／青砥／上野



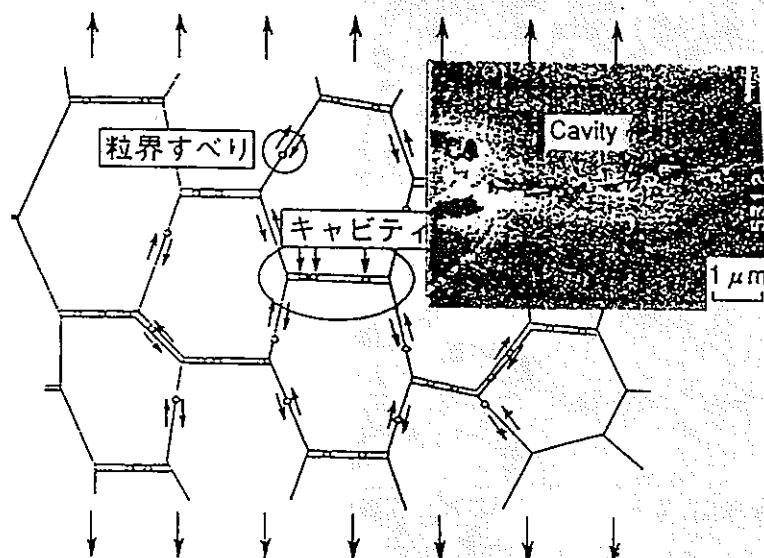
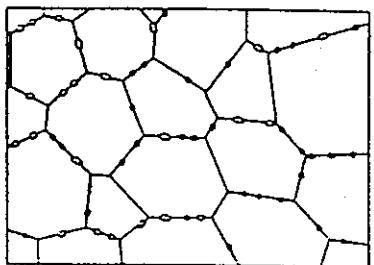


粒界破損条件でのキャビティ挙動観察結果

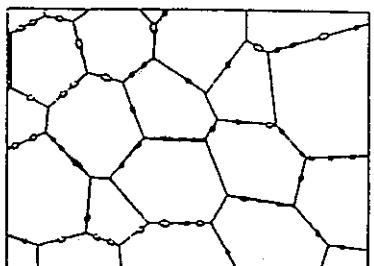
# 長時間クリープ疲労条件下でのミクロ損傷・破壊過程



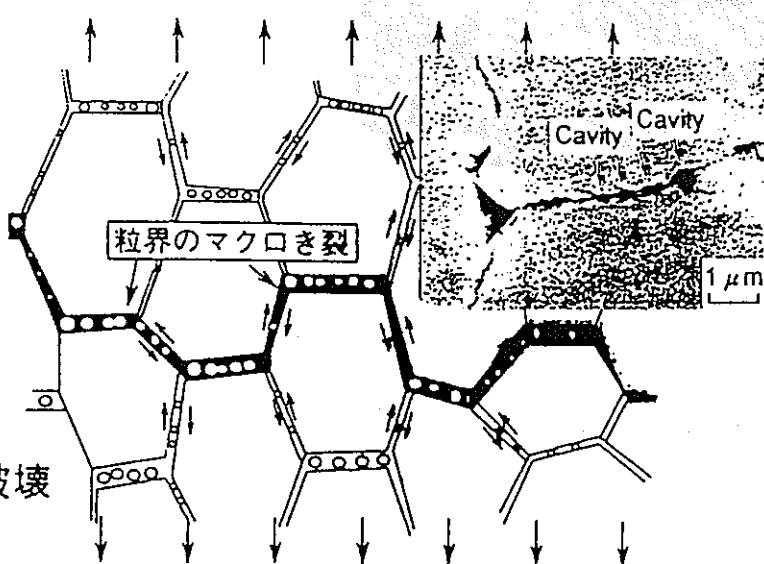
①キャビティの発生・成長



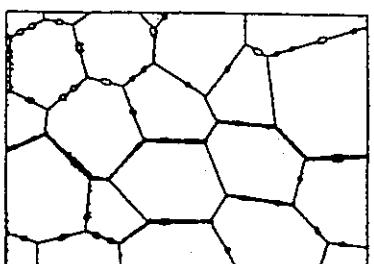
②キャビティ増殖の偏在化



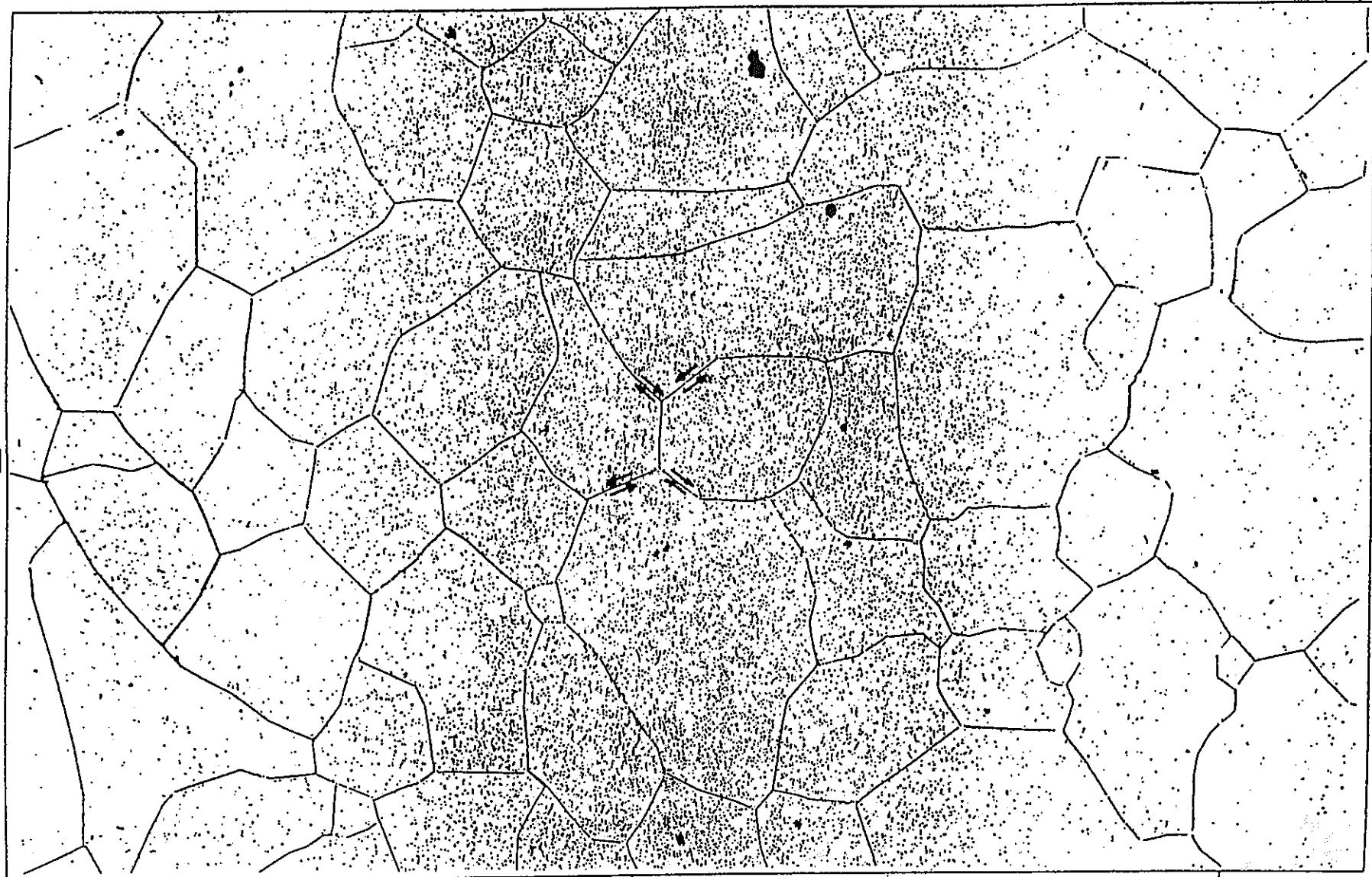
応力の負荷方向  
↑  
↓



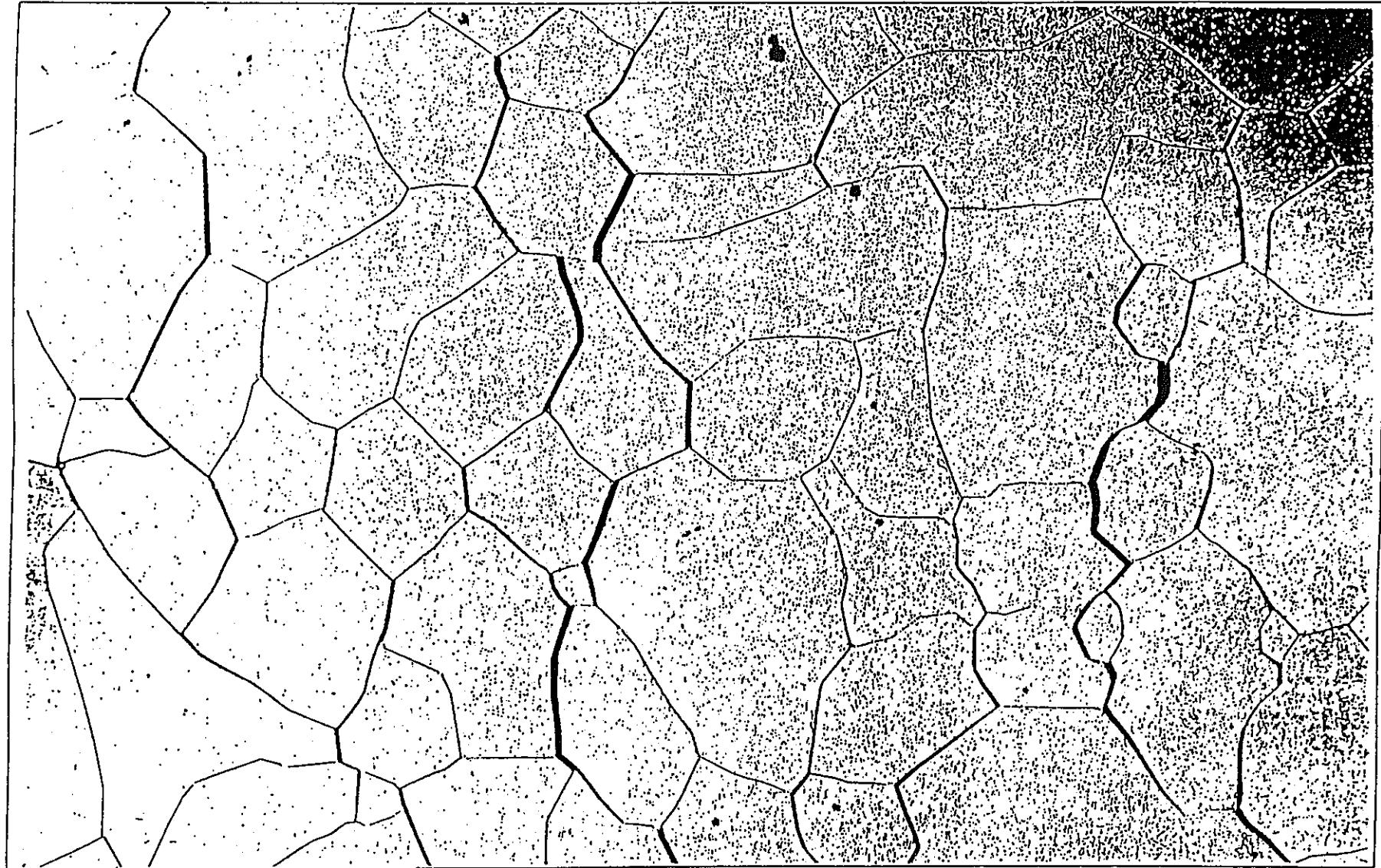
③粒界分離・ミクロき裂発生



④マクロき裂の進展・破壊



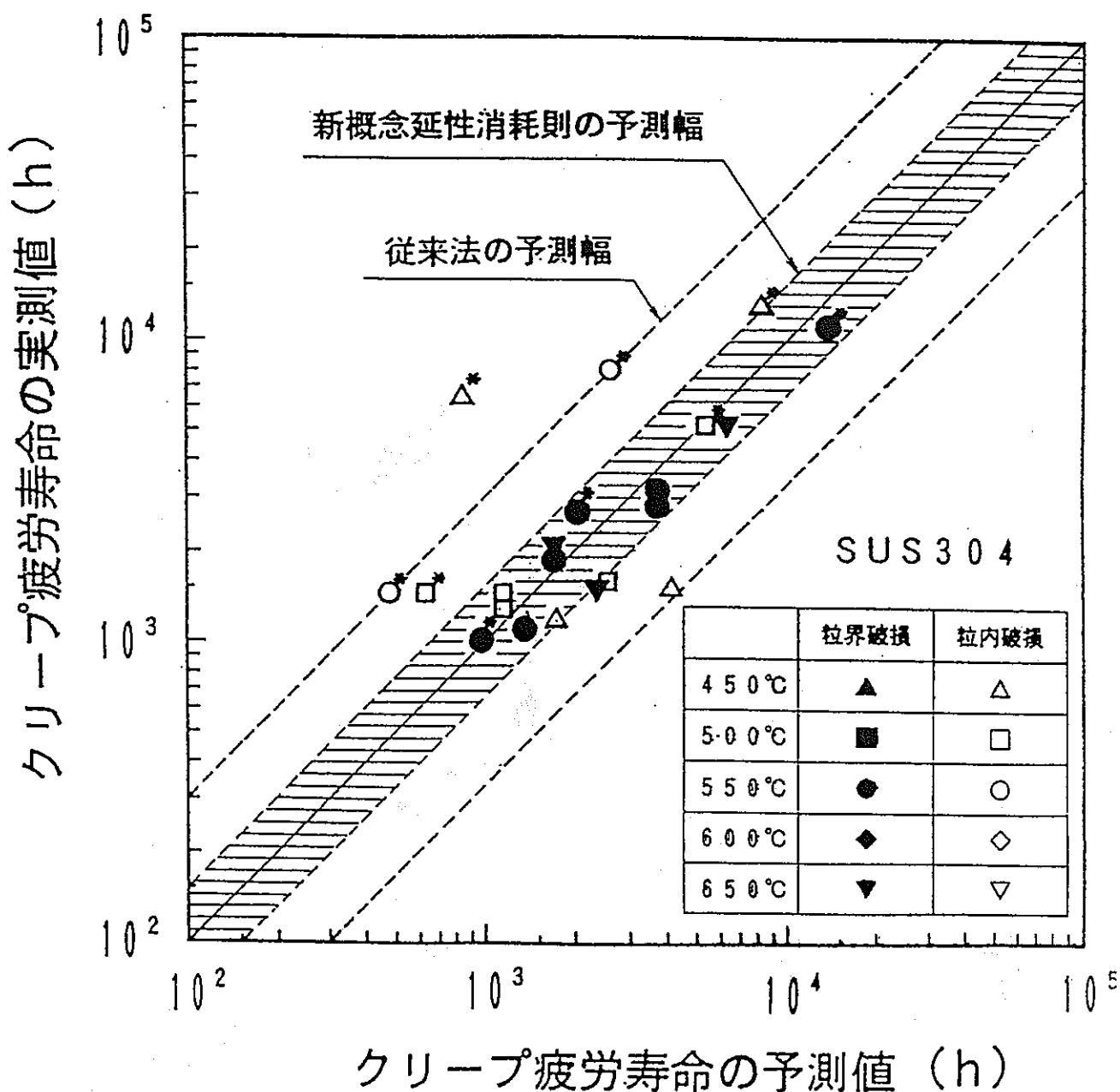
粒界破損機構の概念—受入れ状態の組織



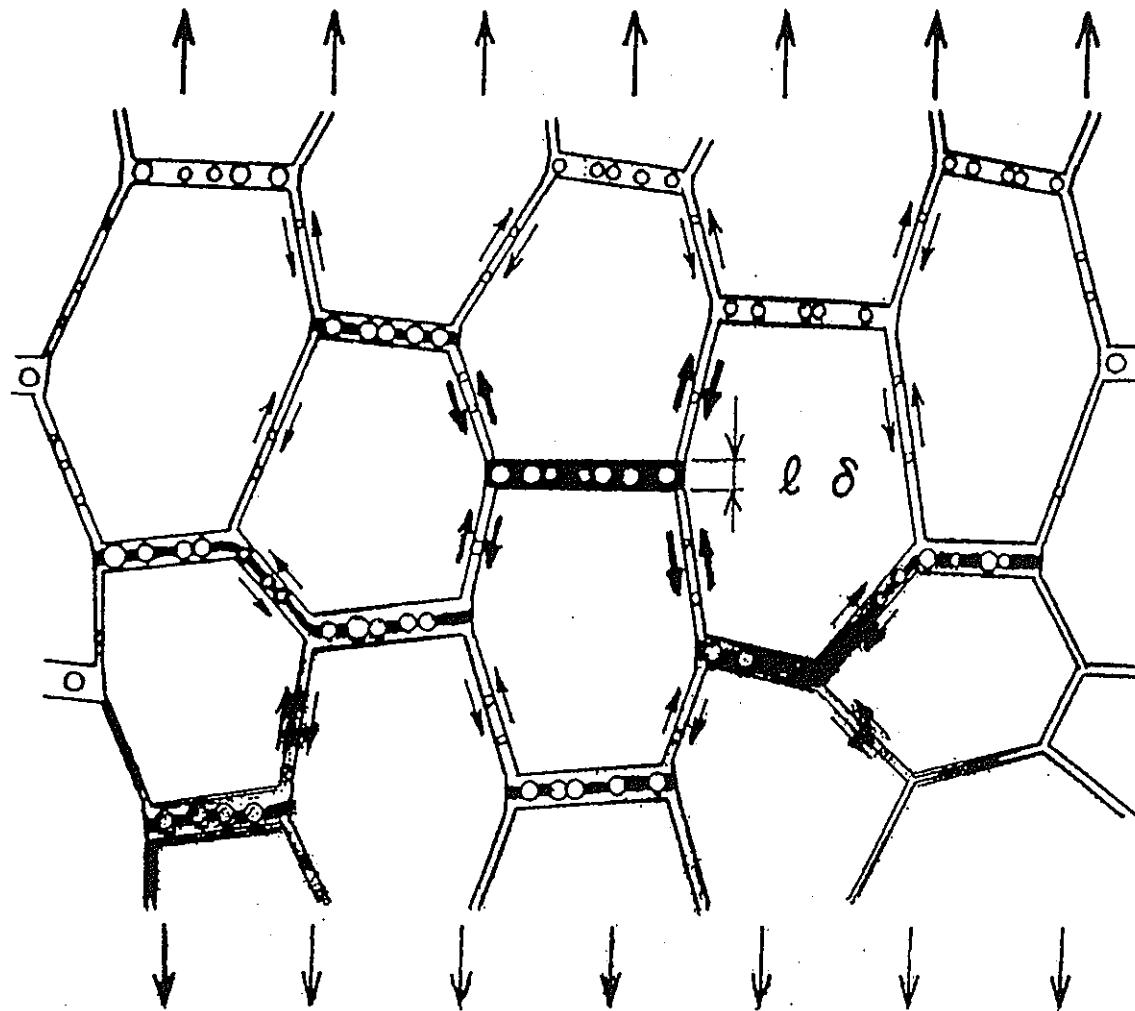
粒界破損機構の概念 一 粒界すべり後の組織

## 新概念延性消耗則の予測精度

- 粒界破損モードでは、大幅な精度向上  
→係数で1.5以内
- 粒内破損モードでは、モデルの性格上従来手法並  
→係数でほぼ3以内



## ■粒界破損のメカニズム



延性消耗破損の条件

$$l \Delta \varepsilon_{gbs} = l \delta$$

$\Delta \varepsilon_{gbs}$  : 粒界すべりひずみ

$l \Delta \varepsilon_{gbs}$  : 粒界面の垂直変位

$l \delta$  : 粒界変位限界値

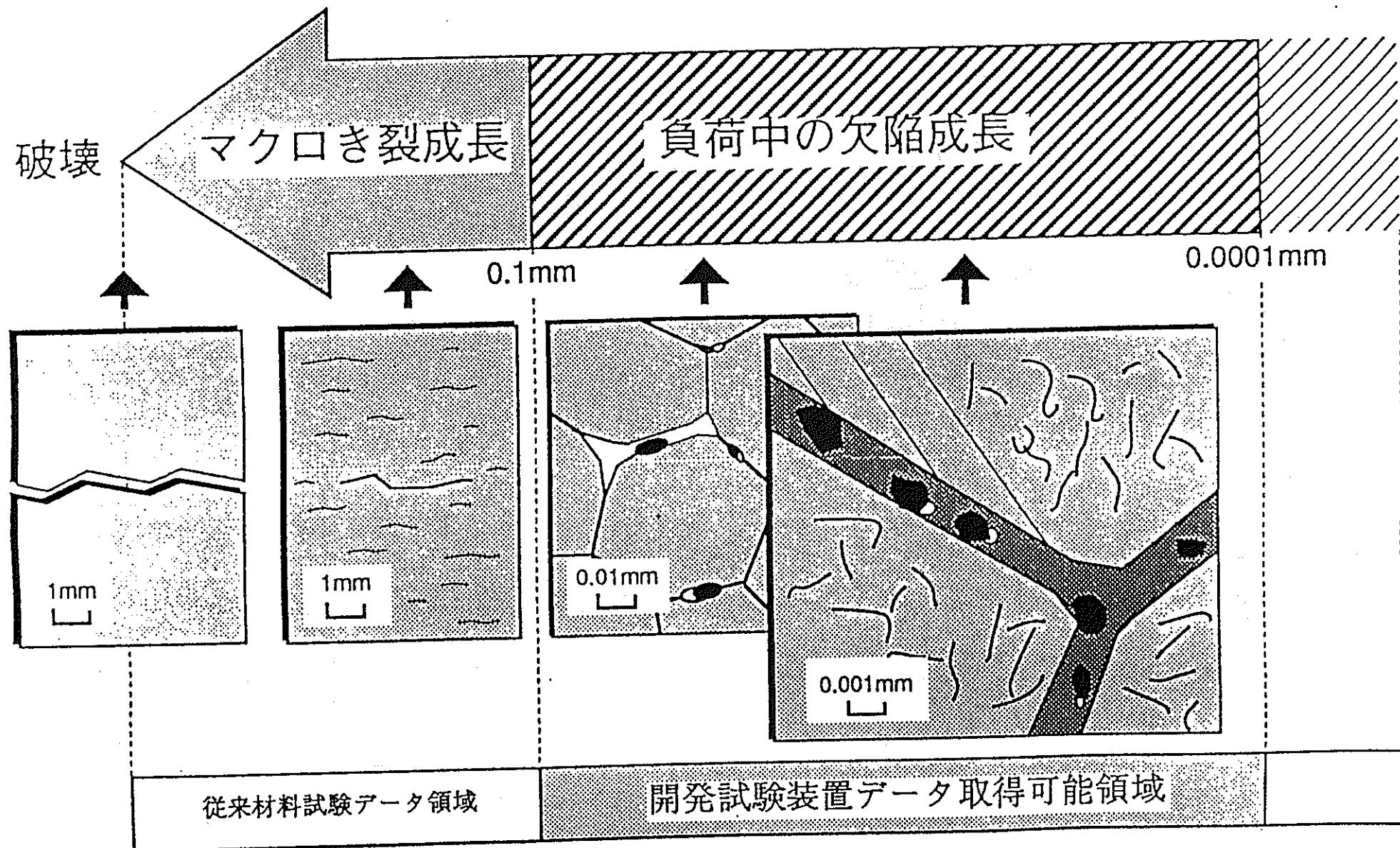
$l$  : 平均粒径

$\delta$  : 延性限界

## 1. 開発目標

高速炉構造材料において防止すべき主要な破損形態であるクリープ疲労に対して、従来の破壊試験を基本に安全係数を乗じて評価する手法を大きく進めて、損傷の発生からき裂の貫通までの破壊過程をシミュレーション評価できる技術がこれから求められる。

このため、結晶粒界に生じる局所の応力－ひずみの解析法の開発を基本に、損傷を支配する粒界すべり機構をミクロの力学モデルから定量的に明らかにし、き裂発生および損傷部のき裂進展を評価する手法を開発する。



## 2. 効果予測

- (1) 材料の破損機構の解明という多くの研究者が目指す究極の技術への大きな前進。
- (2) 許容損傷量（欠陥）を基本とする次世代型設計基準体系の構築。

⇒破壊に対する経験則安全係数型から許容欠陥寸法以下の成長確率に基づく信頼性評価型への発展。

- (3) 供用プラントの経年損傷の定量的な診断法の開発

⇒プラント寿命延伸技術への応用

### 3. 事業団のプロジェクト技術への反映効果

- (1) 高速炉高温構造設計法の合理化／  
高速炉構造の信頼性評価手法の開発
- (2) 常陽、もんじゅの余寿命診断法開発
- (3) 超長寿命高速炉プラントの開発  
(プラントの余寿命診断技術の反映)
- (4) 高性能構造材料開発への反映

#### 4. 国内外の現状レベル

- (1) 火力でプラント寿命延伸に関する研究の一貫として、クリープ損傷機構の解明が進められているが、クリープ疲労に関しては動燃が先見性を發揮し、長時間試験をベースとした信頼性の高い新概念のマクロモデルを開発し国内外で最先端を進んでいる。ミクロモデル開発でも先駆的に進められる。
- (2) 現在、国際的に非常に関心が高まっている分野であり、一気に技術を発展・向上させる機会である。
- (3) 機械と金属の両方の専門家の学際的研究であり動燃の組織は偏りがなく開発に適している。

## 5. 事前評価前の進捗状況

構造材料の寿命・余寿命診断法の開発として、クリープ疲労試験を試験片が破壊する以前の適当な時期に中止し、マクロの力学的な損傷量と実際の材料の組織変化を定量的に調べ、粒界での空孔成長の規則性を検討した。

これによって、粒界すべりが大きな因子となる点と粒界の局所応力評価技術および専用プログラム開発の必要性を明らかにした。

## ■ 5ヶ年計画実施内容

### 1. 粒界局所応力－ひずみ解析法開発

実施方法：解析プログラム開発＝外部実施（ソフト会社）  
期 間：平成6～8年度  
予算・人：15百万円・2人年

### 2. 粒界すべり条件推定

実施方法：粒界すべり量の観察試験＝内部実施（材料開発室）  
期 間：平成7～8年度  
予算・人：10百万円・1人年

### 3. マクロのき裂発生と進展解析法開発

実施方法：解析プログラム開発＝外部実施（ソフト会社）  
損傷材き裂進展試験＝内部実施（材料開発室）  
期 間：平成9～10年度  
予算・人：20百万円・2人年

## □ 局所応力ひずみ評価プログラムの開発－1

### ○ 目的

- ・精度の高い粒界の応力集中／ひずみ集中の評価
- ・外部作用応力からの実粒界応力／粒界変形の推定

### ● 開発の困難さ

#### ○ 粒と粒界の連続空間表示

- ・粒と粒界の大きさの差（粒：約 $50\sim100\ \mu\text{m}$ ，粒界： $\sim0.\text{数}\ \mu\text{m}$ ）
- ・粒界の記述

#### ○ 材料特性

- ・粒／粒界の材料特性（構成方程式）
- ・結晶方位の考慮

## □ 局所応力ひずみ評価プログラムの開発－2

### ○有限要素法による予備解析

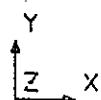
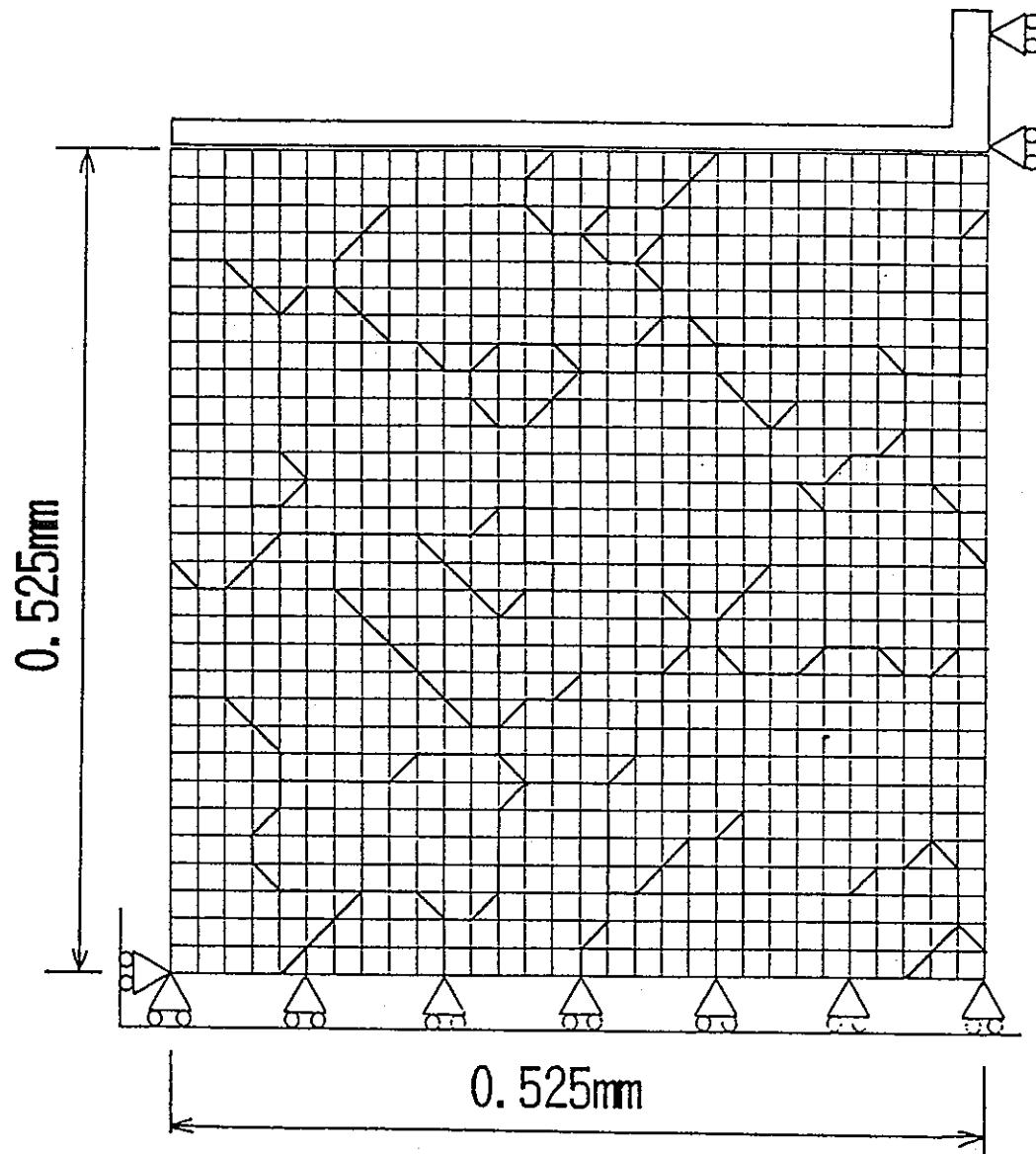
- ・解析対象：SUS304の約 $5 \times 5$ の粒組織（32個の粒構成）
- ・使用要素：  
    粒 - 8節点2次元アイソパラメトリック四辺形要素（平面ひずみ）：981  
    粒界 - 3次元接触要素：623
- ・接点数：3479
- ・解析条件：変動ひずみ0.15%（ひずみ範囲0.3%を想定）
- ・計算時間（15ステップ：CPU）：10min
- ・解析ケース：
  - 〔 固着状態
  - 〔 滑り口開き状態

※接触要素の垂直／水平剛性の組合せ

FINAS

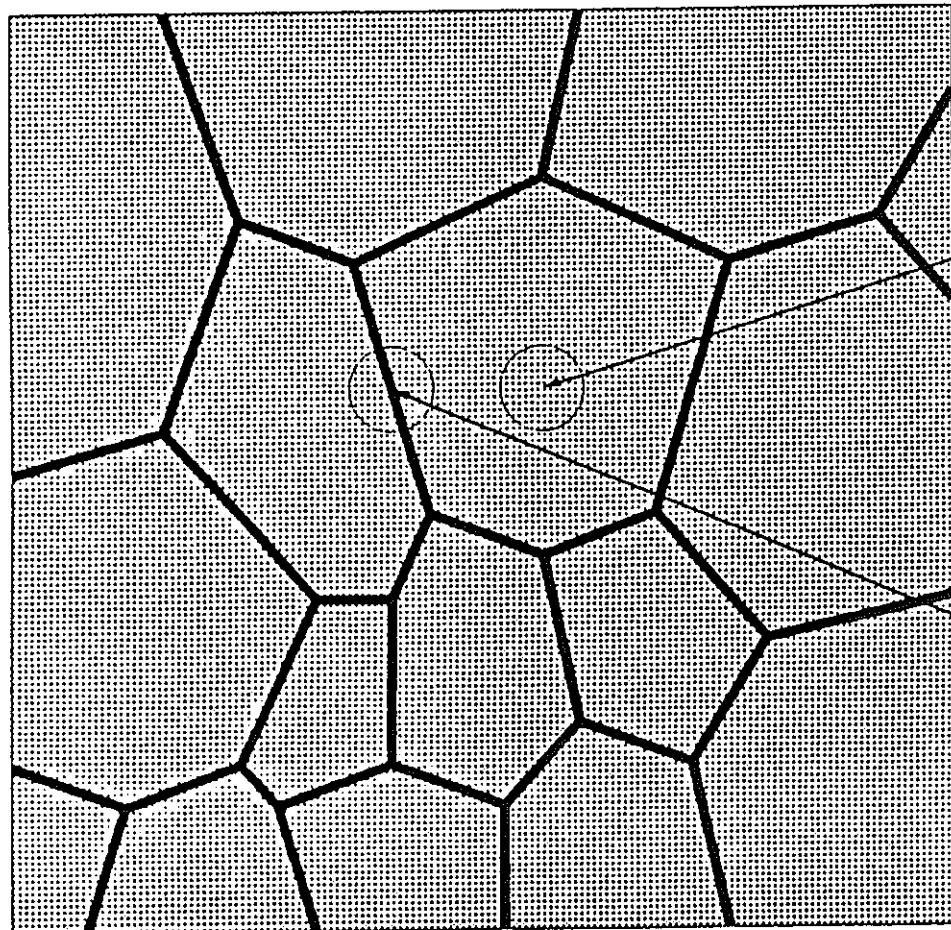
粒界モデル図

変位  $\delta$



GEO11. SCALE 1.00-01

## ■ 原型とする基本モデルのイメージ



結晶粒の特性

結晶粒の塑性構成方程式  
結晶粒のクリープ構成方程式

結晶粒界の特性

結晶粒界の塑性構成方程式  
結晶粒界のクリープ構成方程式

金属のミクロ組織概念図

## □ 局所応力ひずみ評価プログラムの開発－3

### ○ 予備解析結果のまとめ

- ・応力分布 : 粒界が剥離しない場合(固着)では、3重点及び突起部、粒界が剥離した場合(モビリ発生)では、剥離近傍粒界で応力の集中が見られる。  
また、粒界に剥離が生じる以前には圧縮応力はどの粒界にも発生しない。
- ・粒界の剥離 : 負荷と垂直な粒界/垂直に近い粒界から剥離するが、表面近傍では傾斜角を有する粒界の剥離はない。

### ●最大の課題

→ 粒界の変形能力が記述しえない

## □ 局所応力ひずみ評価プログラムの開発－4

### ○ 粒と粒界の空間的表示

- ・有限幅の粒界を考慮した粒／粒界有限要素解析  
⇒ 並列計算機版F1NASによる解析（ステップ1）

### ○ 粒界の記述

- ・粒／粒界とも通常のアイソパラメトリック要素による記述

### ○ 材料特性

- ・巨視的材料特性からの推定
- ・粒／粒界各々に塑性及びクリープ特性を仮定

## ■研究開発スケジュール／予算

	H 5	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10
粒界局所応力－ひずみ 解析法開発		○ 0.8人年 5百万円		○ 0.6人年 5百万円	○ 0.6人年 5百万円	
粒界すべり条件推定 基本現象把握	○ .....	○	○ 0.5人年 5百万円	○ 0.5人年 5百万円		
マクロき裂発生と 進展解析法開発					○ 0.5人年 5百万円	○ 0.5人年 5百万円
損傷材き裂進展試験					○ 0.5人年 5百万円	○ 0.5人年 5百万円

## ■ この5ヶ年の技術開発達成の見込み

1. 粒界すべりの評価に必要な粒界近傍の局所応力－ひずみを推定する解析プログラムの開発は、基本モデルの構想はできており、一定の成果は期待できる。解析結果の精度を検証する実験的手法が確立されていないが、これは別の課題とする。
2. 粒界すべり量測定試験は、粒界と直交させた墨書き線によりすべり量を観察する。すべりが小さい領域での測定となるが達成の見込みはある。
3. 損傷の累積で発生したき裂は、初期欠陥の場合と異なりミクロ欠陥の合体・成長が主体となる。従来理論と異なる概念構築の達成は可能であり、力学モデルとしての一定の成果が期待できる。

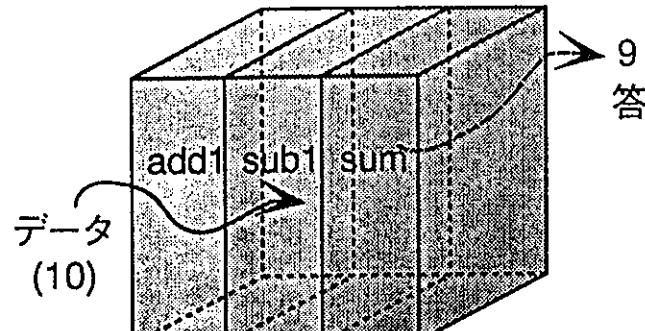
# オブジェクト型汎用シミュレーション手法の開発

-303-

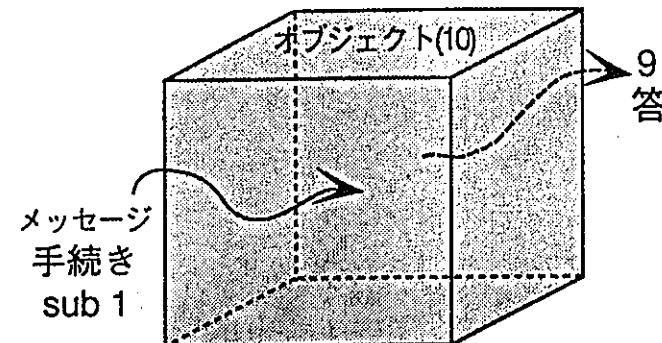
平成6年1月14日

種類	従来型シミュレーション	オブジェクト型汎用シミュレーション
構築手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 完成されたコード群をシミュレーションコードとして作成する または、計算結果の出力処理部を作成する</li> <li>(2) それに対応するように解析対象・条件をその都度、再構築する</li> <li>(3) 共通出力部処理部、可視化ツールもその都度、再構築する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 解析対象・条件を設定する</li> <li>(2) その属性として、計算コード・モデルを選定する</li> <li>(3) 可視化ツールも解析対象・条件の属性として定義する</li> </ul>
実行時	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 定められたシナリオ（解析時間等）以外は実行が出来にくい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 定められたシナリオ（解析時間等）以外も実行が出来やすい</li> </ul>
変更時	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) モデル変更がしにくいため、始めから構築を始める</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) モデル変更がし易い、作成したシミュレーションを再使用できる</li> </ul>

## シミュレーション手法の比較



10 手続き (10) 引数 9 答



10 オブジェクト sub1 メッセージ 9 答

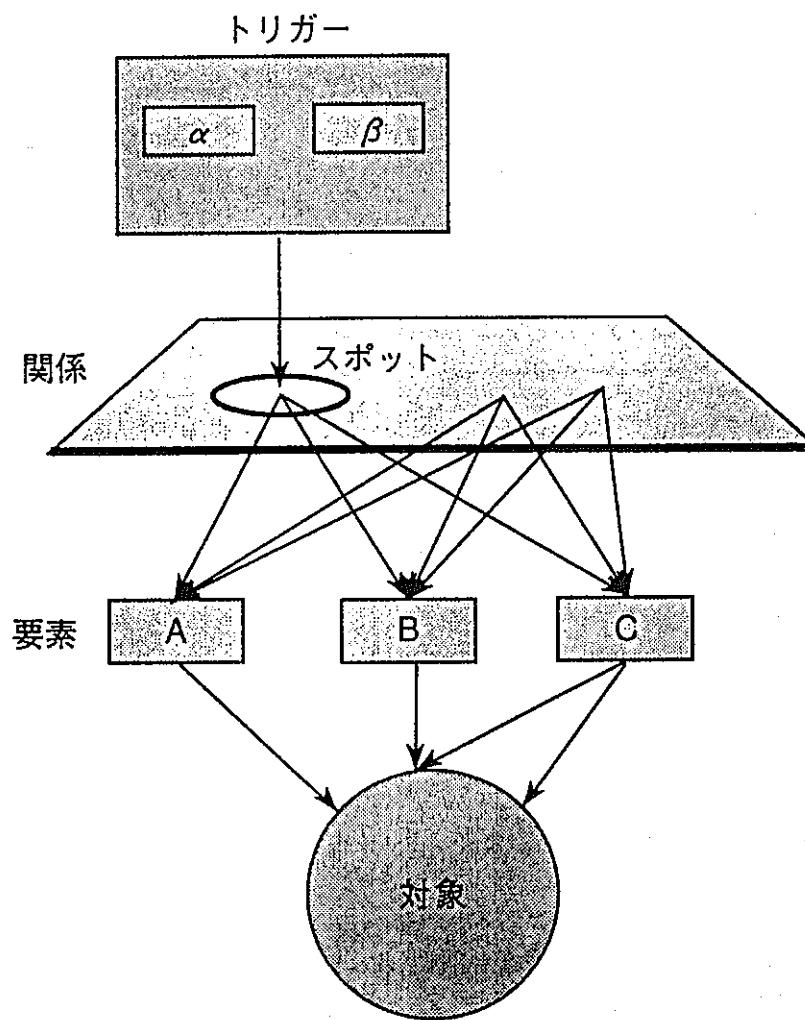
## 言語比較

オブジェクト 10  
内部状態 (10)  
手続きの集まり  
    add1: 内部状態を 1 増加する手続き  
    sub1:  
        内部状態を 1 減少する  
    sum : 0 から 内部状態の値までの和を求める手続き  
        メッセージ・パターン      メソッド

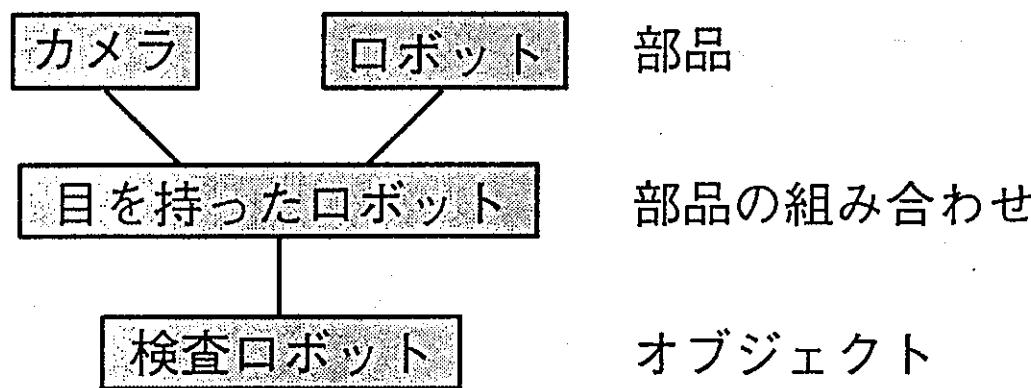
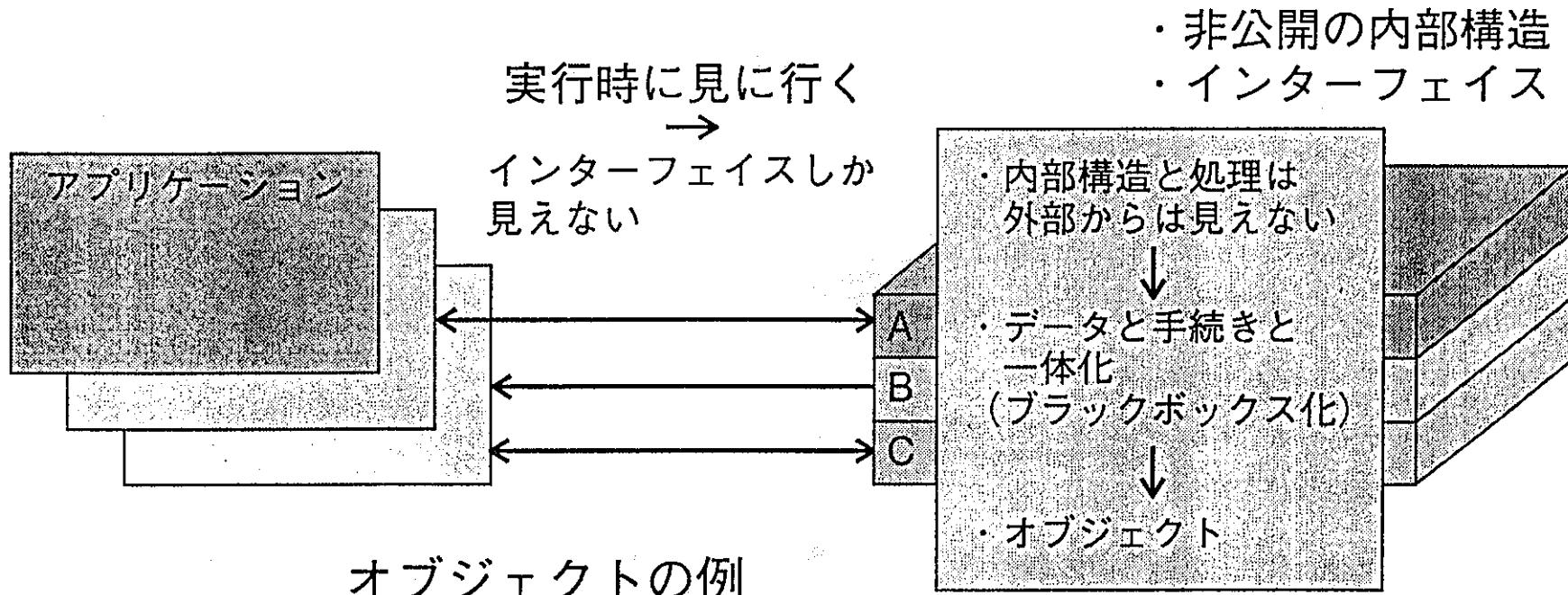
クラス  
正の整数 (PositiveInteger)  
    クラス・メソッド  
    new:value  
    インスタンス・メソッド  
        add1:  
        sub1:  
        sum:

インスタンス 1 . . . . . インスタンス 100

## 言語構造例



状態関係図



実行時の状態

## I モジュール化（部品化）

### (1) 抽象データ型

- ・モジュールの実現と機能の分離
- ・機能の公開

## II 繙承（インヘリタンス）

### (1) 基本クラスと導出クラスの区分

基本クラス（共通部分）

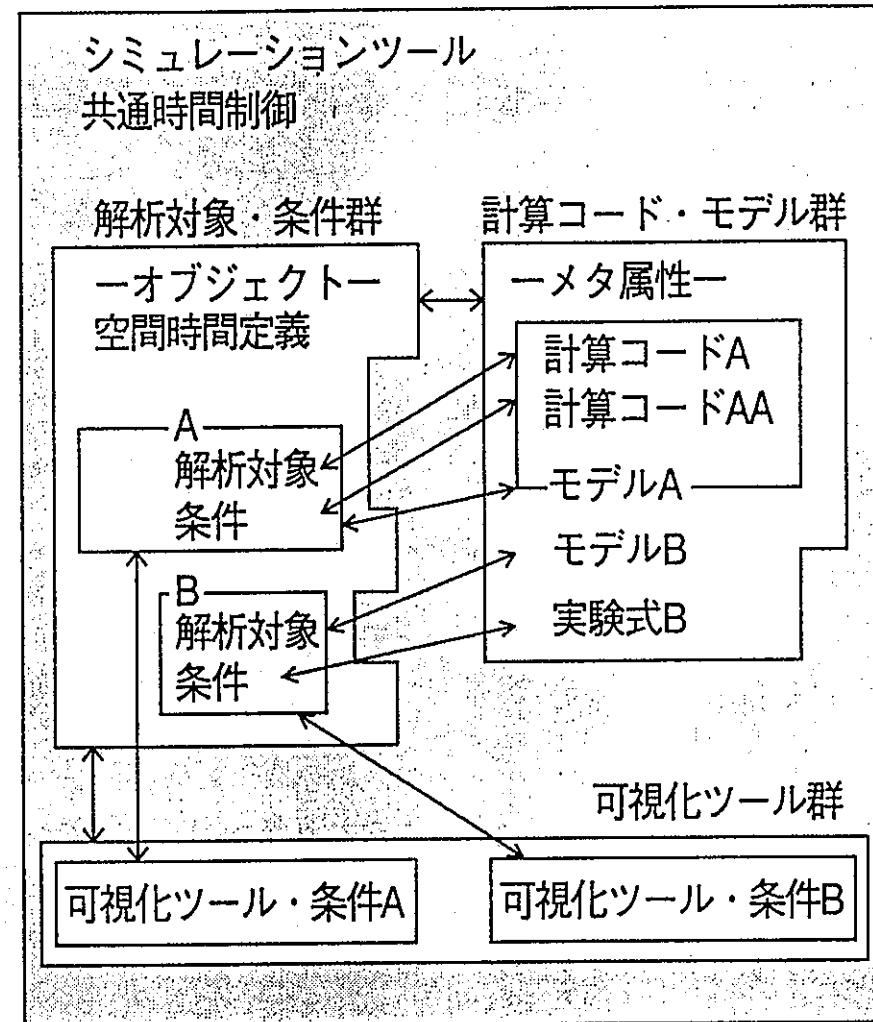
導出クラス（共通でない部分）

## III 動的結合（ダイナミックバインディング）

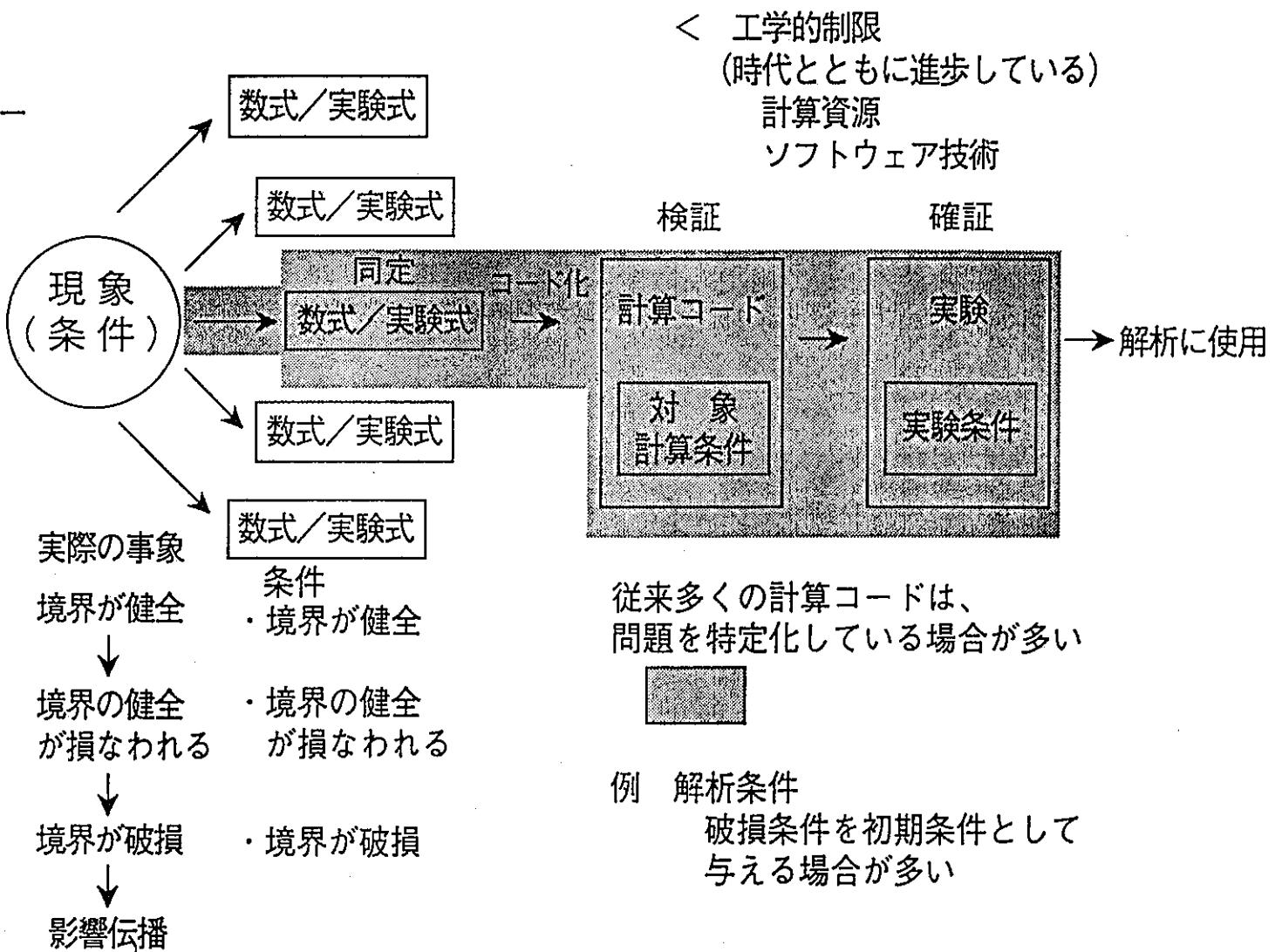
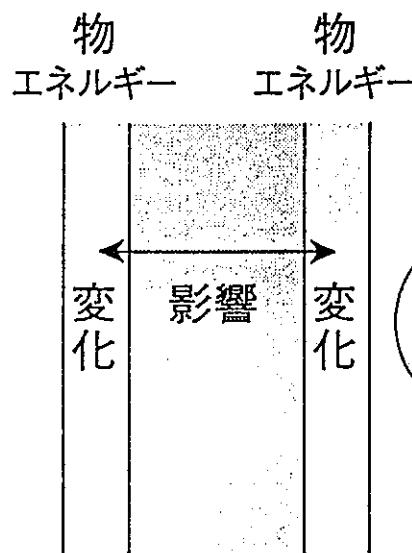
### (1) 動的実行

プログラム実行時に、命令と  
オブジェクトの処理を結び付け、起動

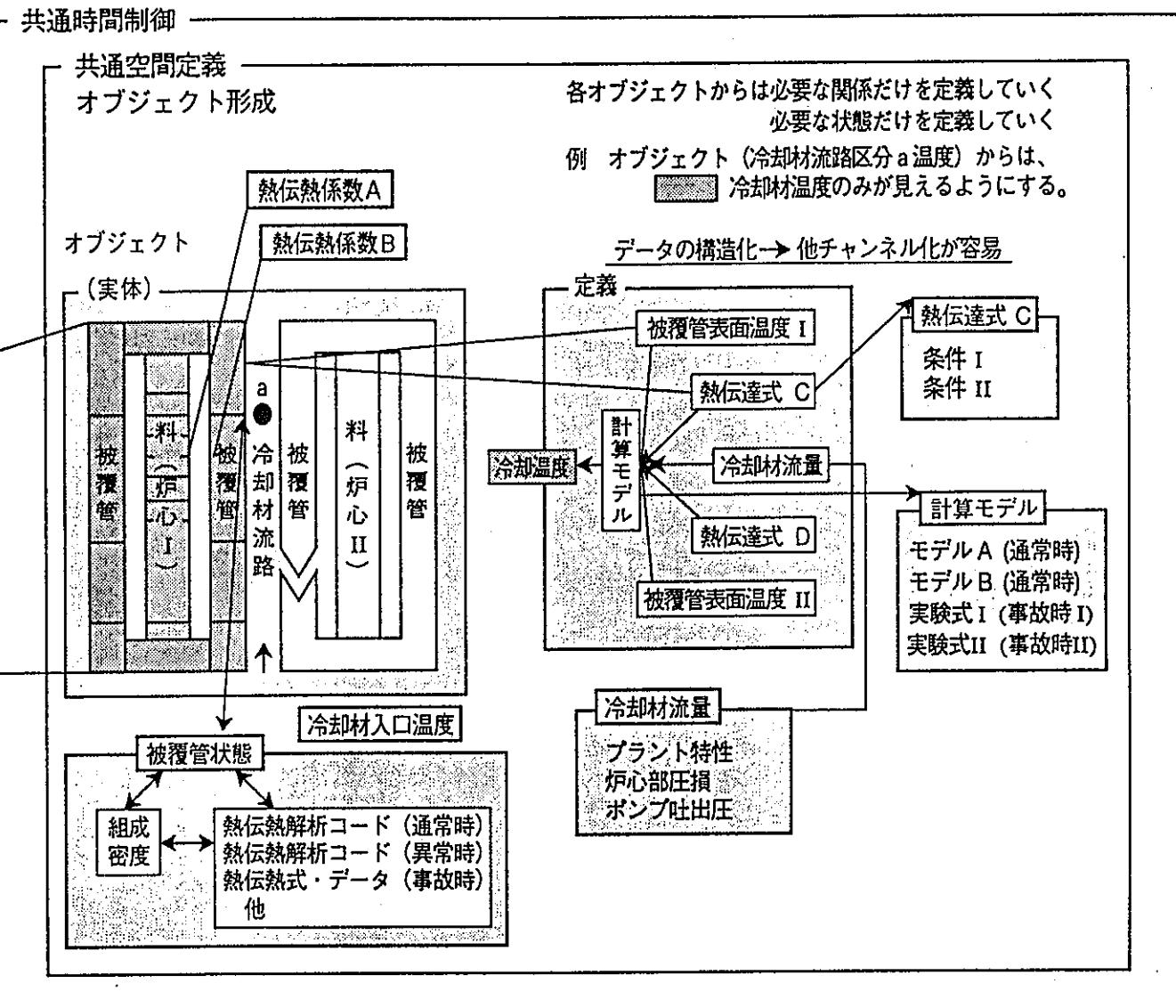
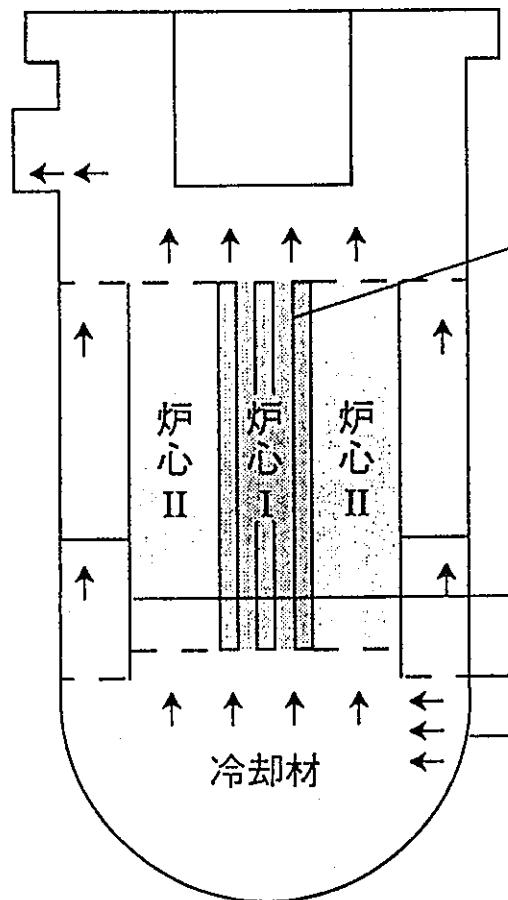
## オブジェクト指向プログラミングの特徴



## オブジェクト型シミュレーション



## モデル化方策



## 原子炉を対象とした例

# オブジェクト型汎用シミュレーション手法の開発

方法 国内外の大学等の研究機関と協力して、開発を行う。

内容 I 準備・調整段階 平成6年度

- (1) 国内外の利用技術の調査

II プロトタイプレベル 平成7～8年度

各参画機関毎に作業を行い、相互チェックを行う。

- (1) 要求仕様決定
- (2) 基本アルゴリズム検討
- (3) 他技術への応用性検討
- (4) プロトタイプ検討・作成

III 実用タイプレベル 平成9～10年度

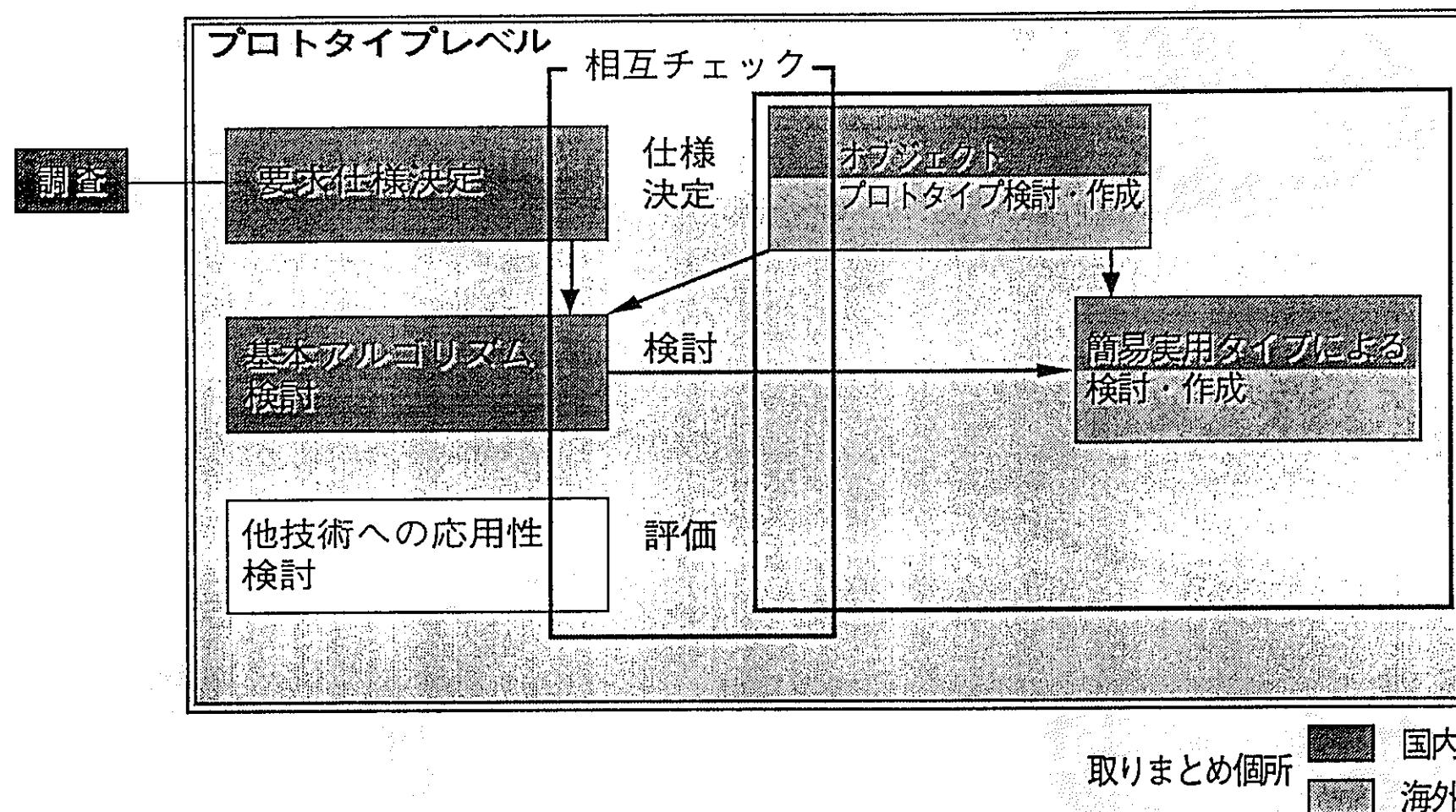
各参画機関毎により実用タイプモデルの作成を行う。

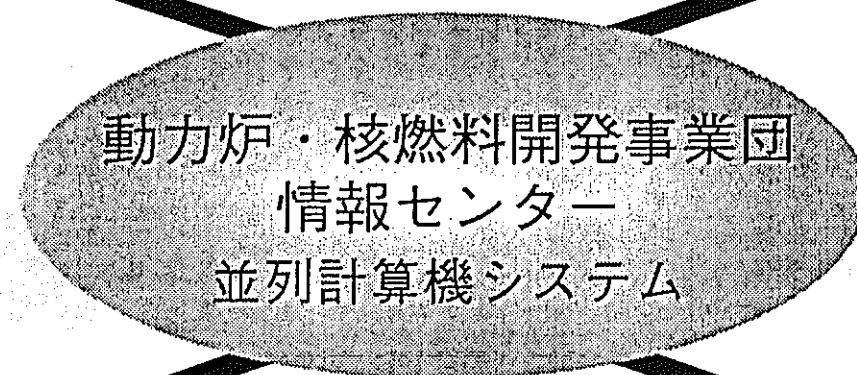
- (1) 簡易実用タイプによる検討・作成

平成6年度

平成7~8年度

平成9~10年度





計算機システムネットワーク

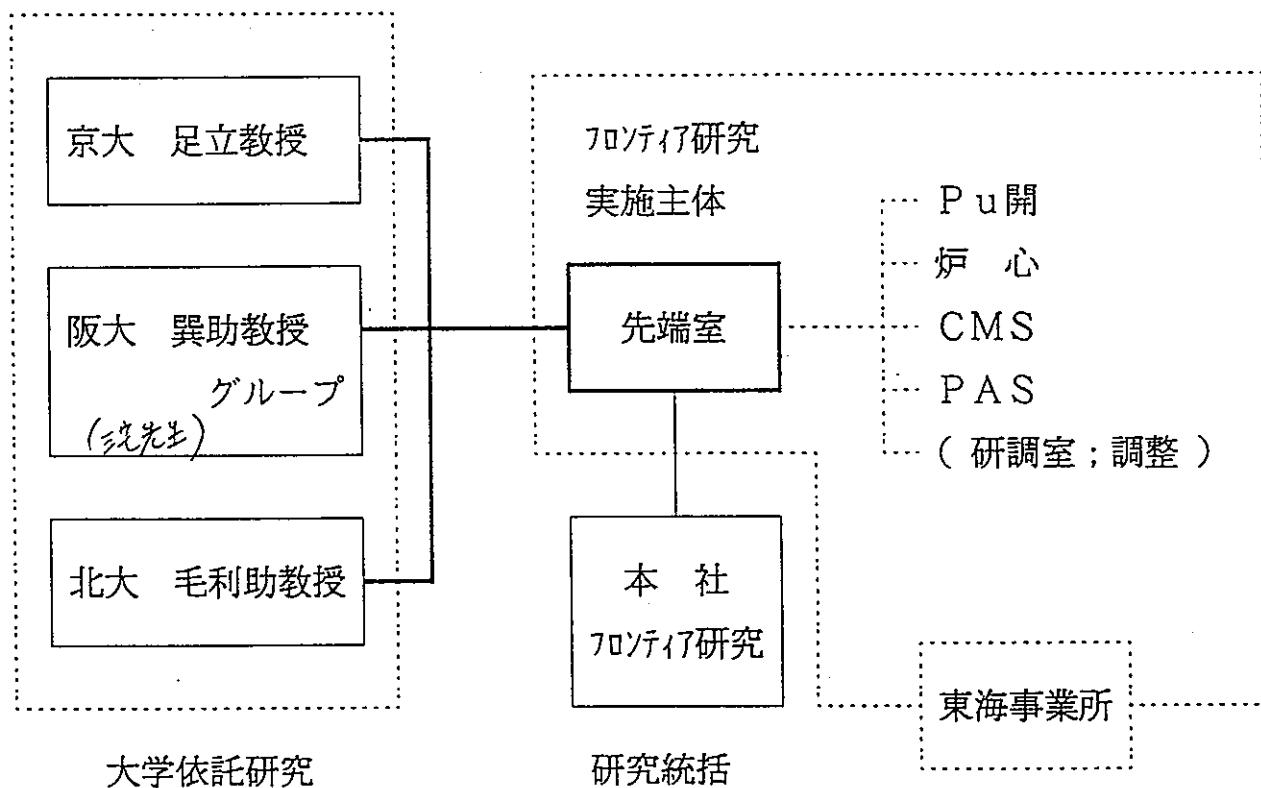
アクチニド系化合物の  $5\ f$  電子挙動に関する  
量子化学的計算手法の研究

## 『量子化学的計算法の研究』の体制について（案）

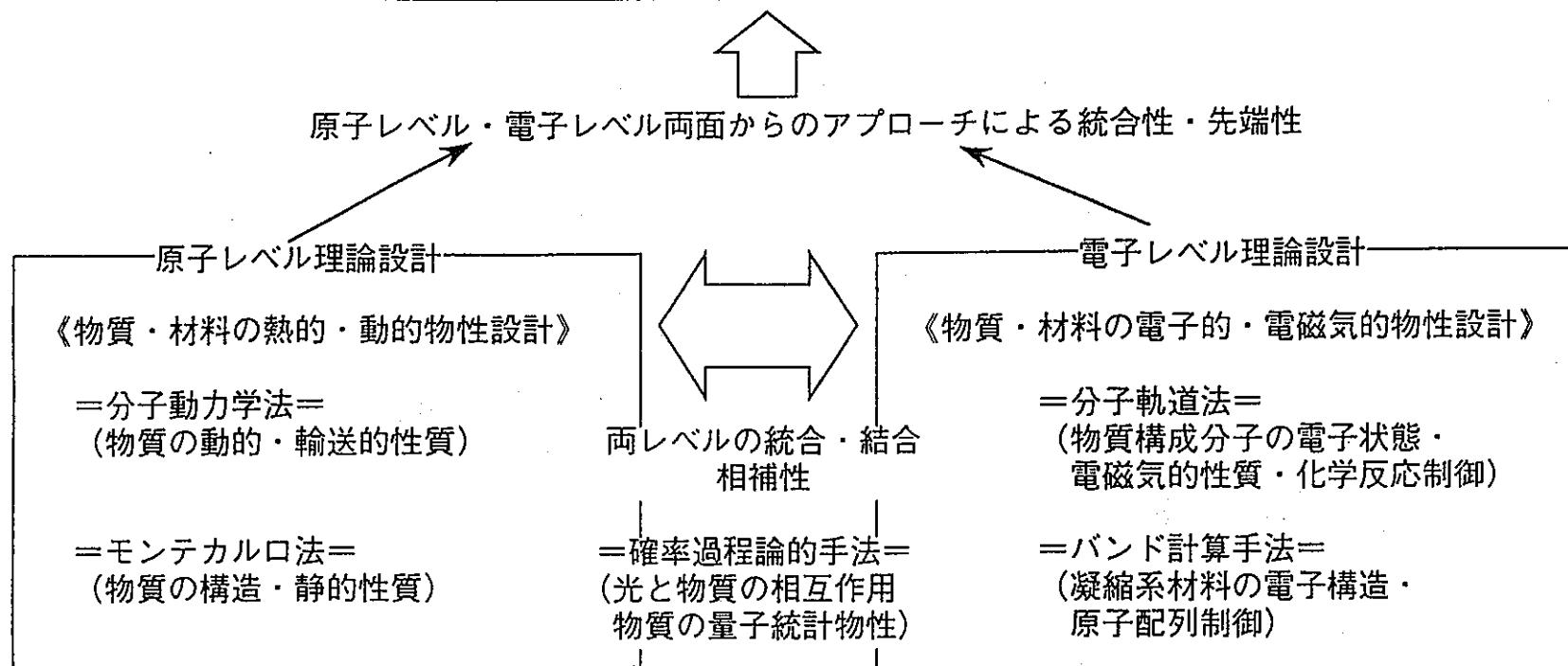
### 1. 研究の進め方

- ・研究の性格上、大学との共同研究、依託研究を基にして進める。
- ・共同、依託研究はミニクロスオーバー研究として、動燃との連携を軸に進める。
- ・研究の総合的な研究管理、研究協力については本社が取り扱う。
- ・研究に実施主体は核開部先端室が行う。

### 2. 研究機関の関係



## 原子・電子レベルからの物質・材料設計



全熱力学量 (融点、沸点、比熱、熱膨張率、  
圧縮率、エンタルピー、自由エネルギーなど)  
電気伝導度、粘度、熱伝導率、音速、フォノン物性、  
物質の原子配列、動径分布関数、構造因子、  
誘電率、屈折率、感受率、動的構造因子、  
非弹性散乱緩和関数、イオンビーム照射による  
固体表層物性など  
基準振動数、分極率、超分極率、  
赤外吸収・ラマン散乱強度、電子密度分布、

反応活性部位、反応経路相対安定性など  
固体、液体、アモルファス材料、固体中の  
格子欠陥 (点欠陥、不純物、表面、界面、粒界)  
の電子構造、全エネルギー、最安定原子配列構造など  
平衡核配置、化学反応経路、分子間ポテンシャル、  
反応遷移状態、励起エネルギー、  
イオン化ポテンシャル、電子親和力、力の定数、  
双極子モーメント、電子遷移吸収強度、  
スピンドensity分布、微細結合定数、NMR化学シフト

5つの手法の相互関係と将来の発展方向

(2) 2元系ウラン合金について

U-X Binary Alloy Phase Diagram

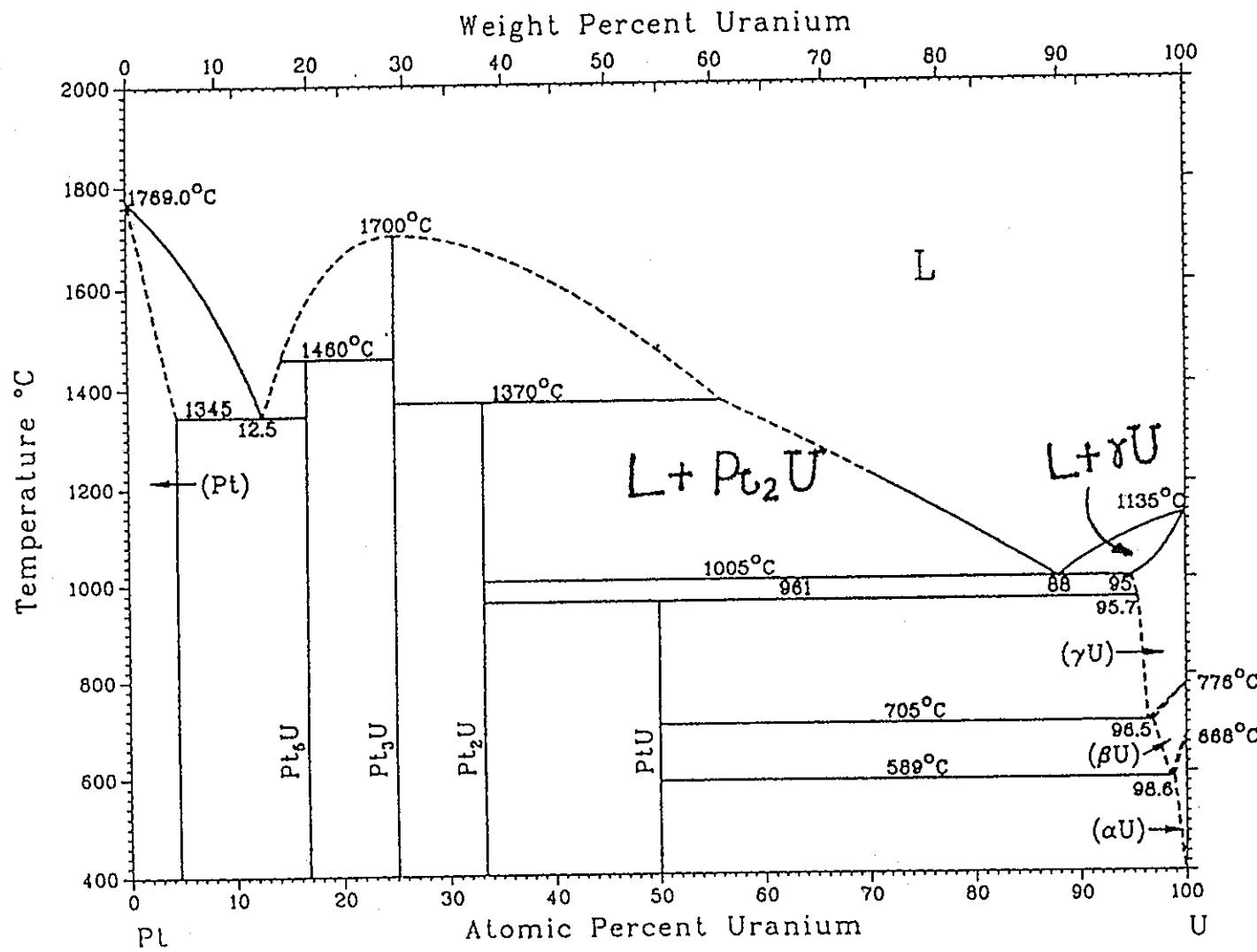
II 元素の周期表 (a) 長周期型

数字は原子番号

族 周期	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8	1 B	2 B	3 B	4 B	5 B	6 B	7 B	0		
1	1 H															2 He		
2	3 Li	4 Be							5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
3	11 Na	12 Mg							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57~71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89~103															

*ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Pt-U Phase Diagram



II 元素の周期表 (a) 長周期型

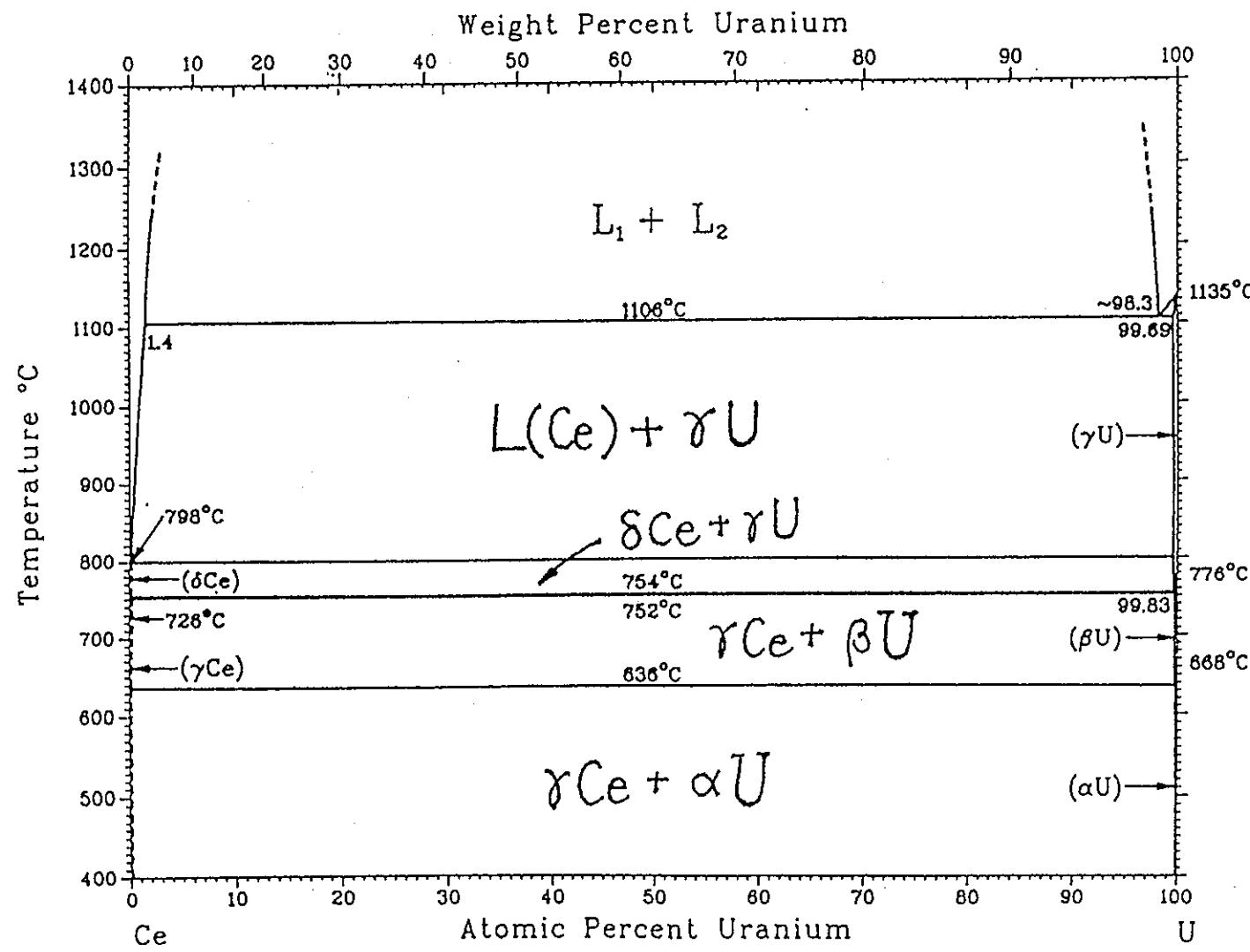
数字は原子番号

周期 族	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8	1 B	2 B	3 B	4 B	5 B	6 B	7 B	0		
1	1 H															2 He		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57~71*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89~103**															

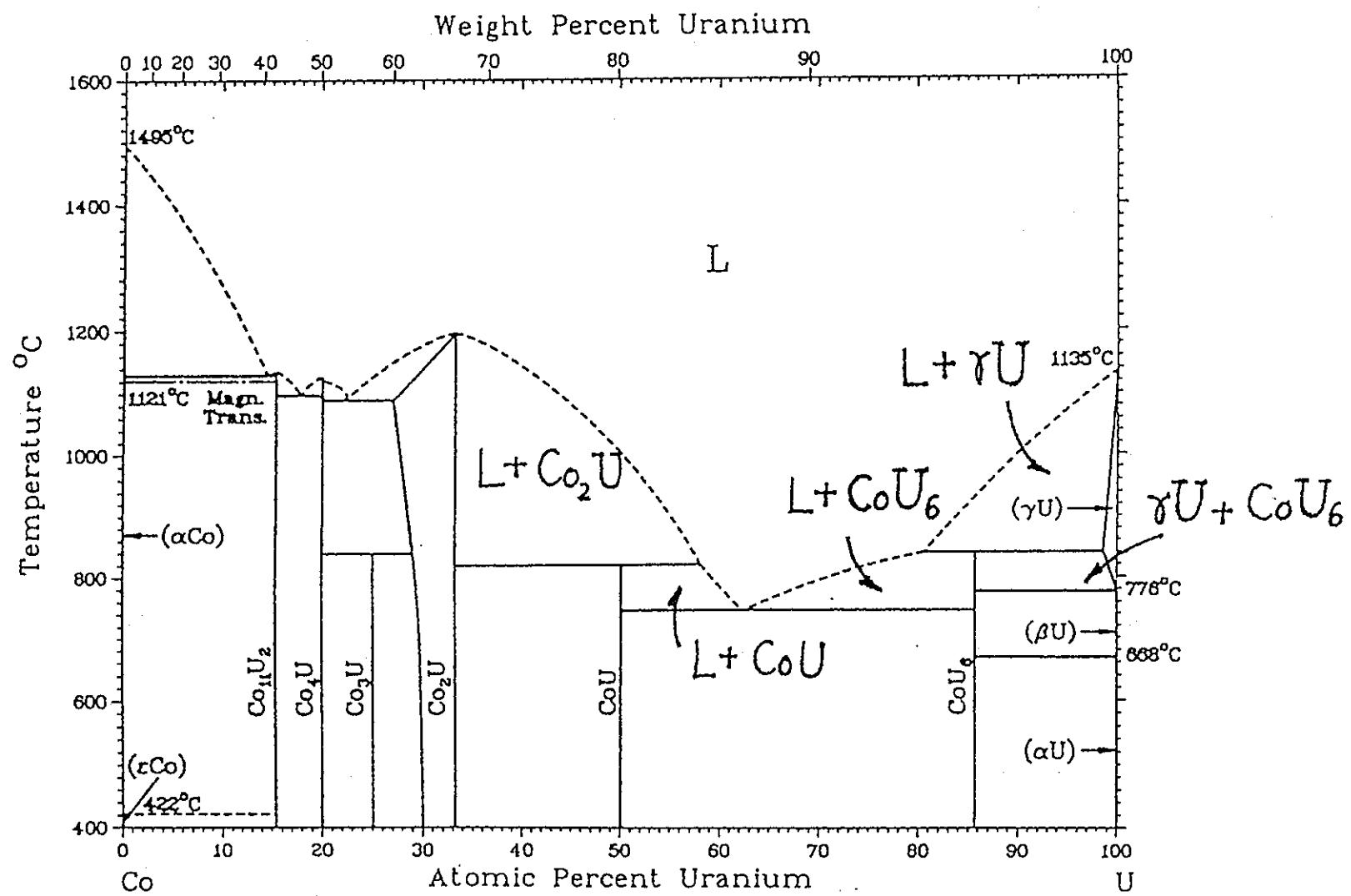
*ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

U-X 2成分系状態図のタイプ

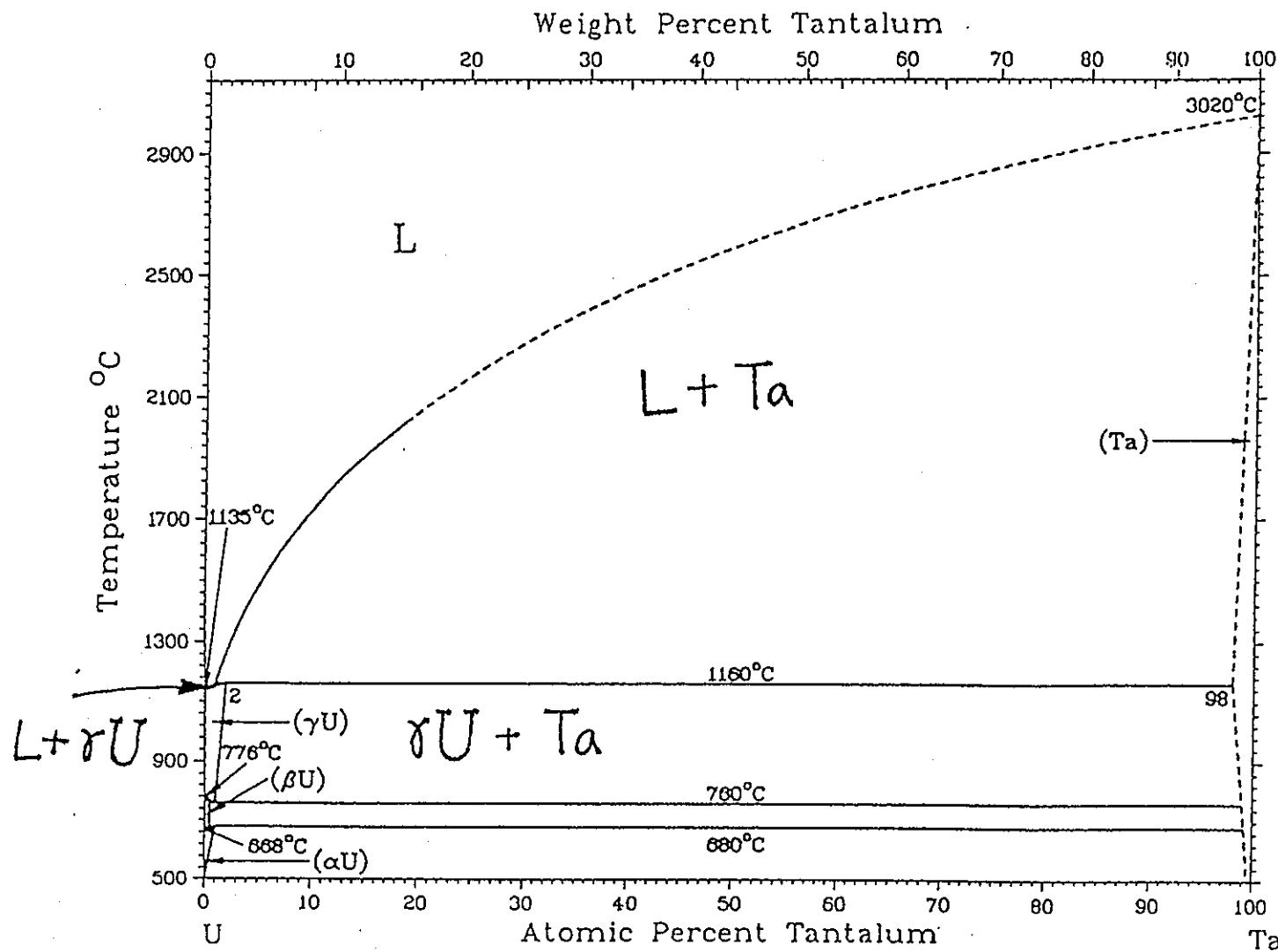
## Ce-U Phase Diagram



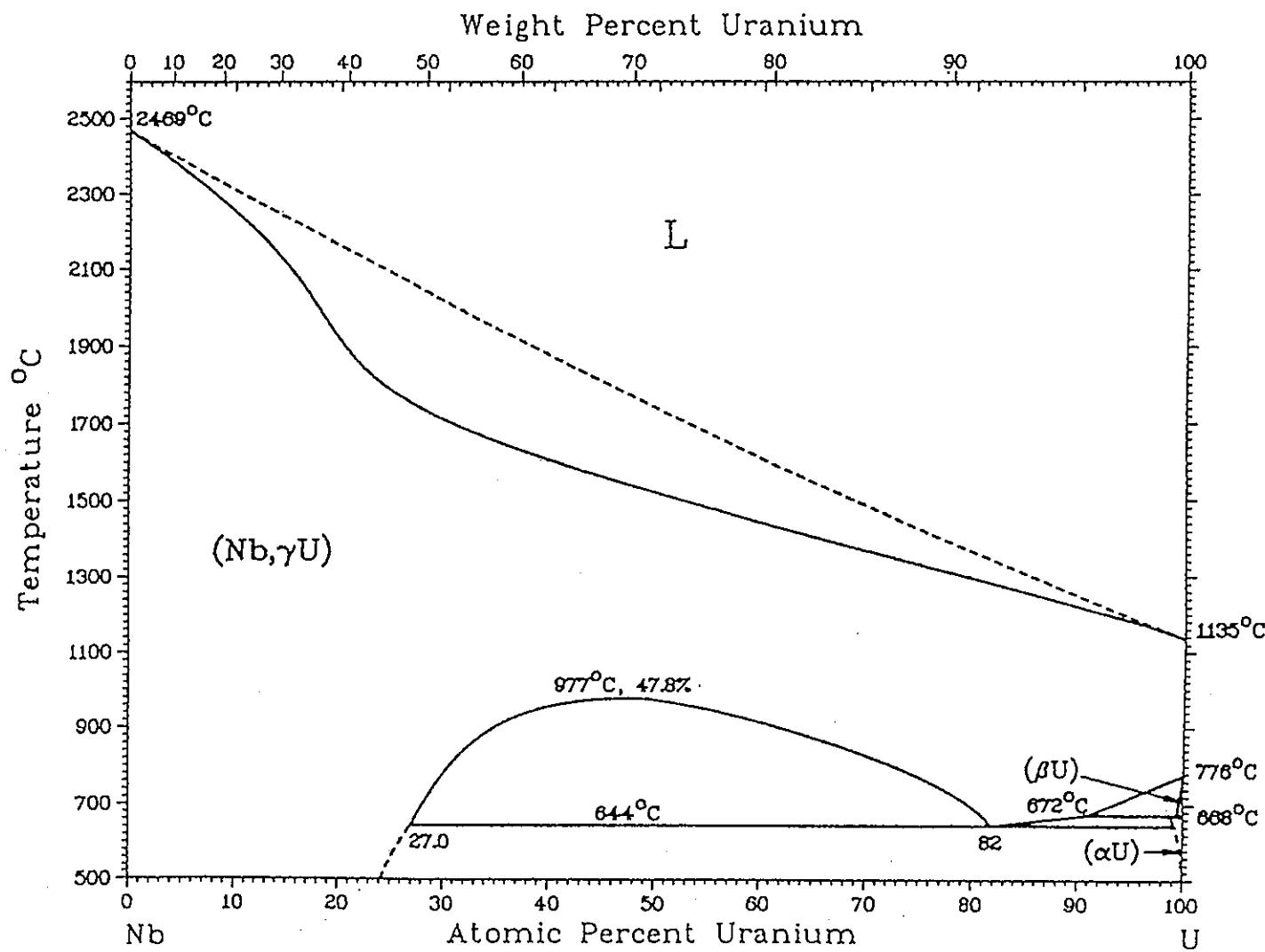
Co-U Phase Diagram



## U-Ta Phase Diagram



## Nb-U Phase Diagram



<b>11.3 Compounds of Uranium with Other Metals and Selenium . . . . .</b>	<b>51</b>
11.3.1 UGeSe (USnSe) . . . . .	51
11.3.2 $U_xTh_{1-x}Se$ . . . . .	52
11.3.3 $M_2USe_4$ and $M_2U_xSe_{3+x}$ . . . . .	53
11.3.4 MUSe <sub>3</sub> . . . . .	54
11.3.5 MU <sub>2</sub> Se <sub>5</sub> and M <sub>x</sub> U <sub>3-x</sub> Se <sub>5</sub> . . . . .	57
11.3.6 MU <sub>8</sub> Se <sub>17</sub> . . . . .	58
<b>12.3 Compounds of Uranium with Other Metals and Tellurium . . . . .</b>	<b>128</b>
12.3.1 UMTe . . . . .	128
12.3.2 $U_xM_{1-x}Te$ . . . . .	130
$U_xSn_{1-x}Te$ . . . . .	130
$U_xPb_{1-x}Te$ . . . . .	131
$U_xTh_{1-x}Te$ . . . . .	132
12.3.3 $M_2UTe_4$ and $M_2U_xTe_{3+x}$ . . . . .	133
<b>12.6 Compounds of Uranium with Tellurium and Halogens . . . . .</b>	<b>152</b>
12.6.1 The Uranium Oxopentafluorotellurates $F_xU(OTeF_5)_{6-x}$ . . . . .	152
12.6.2 The $U_2Te_3$ -Br <sub>2</sub> and UTe <sub>2</sub> -Br <sub>2</sub> Systems . . . . .	155
<b>12.7 Compounds of Uranium with Tellurium and Sulfur . . . . .</b>	<b>156</b>
12.7.1 The U-Te-S System . . . . .	156
12.7.2 Uranium Telluride Sulfides . . . . .	162
UTeS . . . . .	162
<b>12.8 Compounds of Uranium with Tellurium and Selenium . . . . .</b>	<b>165</b>
12.8.1 The U-Te-Se System . . . . .	165
12.8.2 Uranium Telluride Selenides . . . . .	175
UTe <sub>2</sub> -USe <sub>2</sub> Solid Solutions . . . . .	175
12.8.3 The U-O-Te-Se System . . . . .	177
<b>13.3 Systems with Uranium, Other Metals, and Boron . . . . .</b>	<b>198</b>
13.3.1 The Systems U-Y-B and U-Lanthanides-B . . . . .	198
13.3.2 The U-Th-B System . . . . .	201
13.3.3 The U-Ti-B, U-Zr-B, and U-Hf-B Systems . . . . .	203
13.3.4 The U-V-B, U-Nb-B, and U-Ta-B Systems . . . . .	206
13.3.5 The U-Cr-B, U-Mo-B, and U-W-B Systems . . . . .	206
13.3.6 The U-Mn-B and U-Re-B Systems . . . . .	206
13.3.7 The U-Fe-B, U-Co-B, and U-Ni-B Systems . . . . .	207
13.3.8 The U-Ru-B System . . . . .	210
13.3.9 UOs <sub>4</sub> B <sub>4</sub> . . . . .	210

<b>15.2 Ternary Silicides . . . . .</b>	<b>353</b>
<b>15.2.1 Survey . . . . .</b>	<b>353</b>
<b>15.2.2 The U-Al-Si System . . . . .</b>	<b>353</b>
The Section $UAl_2-U_3Si_2$ . . . . .	353
The Region $U-UAl_2-U_3Si_2$ . . . . .	354
Diffusion . . . . .	358
Corrosion Resistance . . . . .	358
Application as Nuclear Fuels . . . . .	358
<b>15.2.3 The U-Ce-Si System. . . . .</b>	<b>358</b>
<b>15.2.4 The U-Ti-Si System . . . . .</b>	<b>359</b>
<b>15.2.5 The U-Zr-Si System . . . . .</b>	<b>359</b>
<b>15.2.6 The U-Ge-Si System. . . . .</b>	<b>359</b>
<b>15.2.7 The U-V-Si System . . . . .</b>	<b>360</b>
<b>15.2.8 The U-Nb-Si System . . . . .</b>	<b>360</b>
<b>15.2.9 The U-Cr-Si System. . . . .</b>	<b>361</b>
$U_4Cr_5Si_3$ . . . . .	361
$UCr_2Si_2$ . . . . .	361
$U_2Cr_3Si$ . . . . .	361
<b>15.2.10 The U-Mo-Si System. . . . .</b>	<b>361</b>
$U_4Mo_5Si_3$ . . . . .	361

	Page
15.2.11 The U-W-Si System . . . . .	362
15.2.12 The U-Mn-Si System . . . . .	362
$U_4Mn_5Si_3$ . . . . .	362
$UMn_2Si_2$ . . . . .	362
$U_2Mn_3Si_5$ . . . . .	363
15.2.13 The U-Ni-Si System . . . . .	364
$U[Ni_{0.68}Si_{0.32}]_{11}$ . . . . .	364
$UNi_5Si_3$ . . . . .	364
$U_2Ni_2Si_7$ . . . . .	366
$UNi_2Si_2$ . . . . .	367
15.2.14 The U-Co-Si System . . . . .	367
$UCo_5Si_3$ . . . . .	367
$U_2Co_3Si_5$ . . . . .	369
$UCo_2Si_2$ . . . . .	371
$U_2Co_3Si$ . . . . .	371
15.2.15 The U-Fe-Si System . . . . .	371
Phase Diagram . . . . .	371
The Compounds . . . . .	374
$UFeSi_3$ . . . . .	374
$UFe_2Si_2$ . . . . .	374
$U_2Fe_3Si$ and $U_2FeSi_3$ . . . . .	374
$U_4Fe_5Si_3$ . . . . .	374

15.2.16	The U-Cu-Si System . . . . .	374
	UCu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> . . . . .	374
15.2.17	The U-Ag-Si System . . . . .	374
15.2.18	The U-Au-Si System . . . . .	375
15.2.19	The U-Rh-Si System . . . . .	375
15.2.20	The U-Pd-Si System . . . . .	375
15.2.21	The U-Pt-Si System . . . . .	375

## 2元系プルトニウム合金について

II 元素の周期表 (a) 長周期型

数字は原子番号

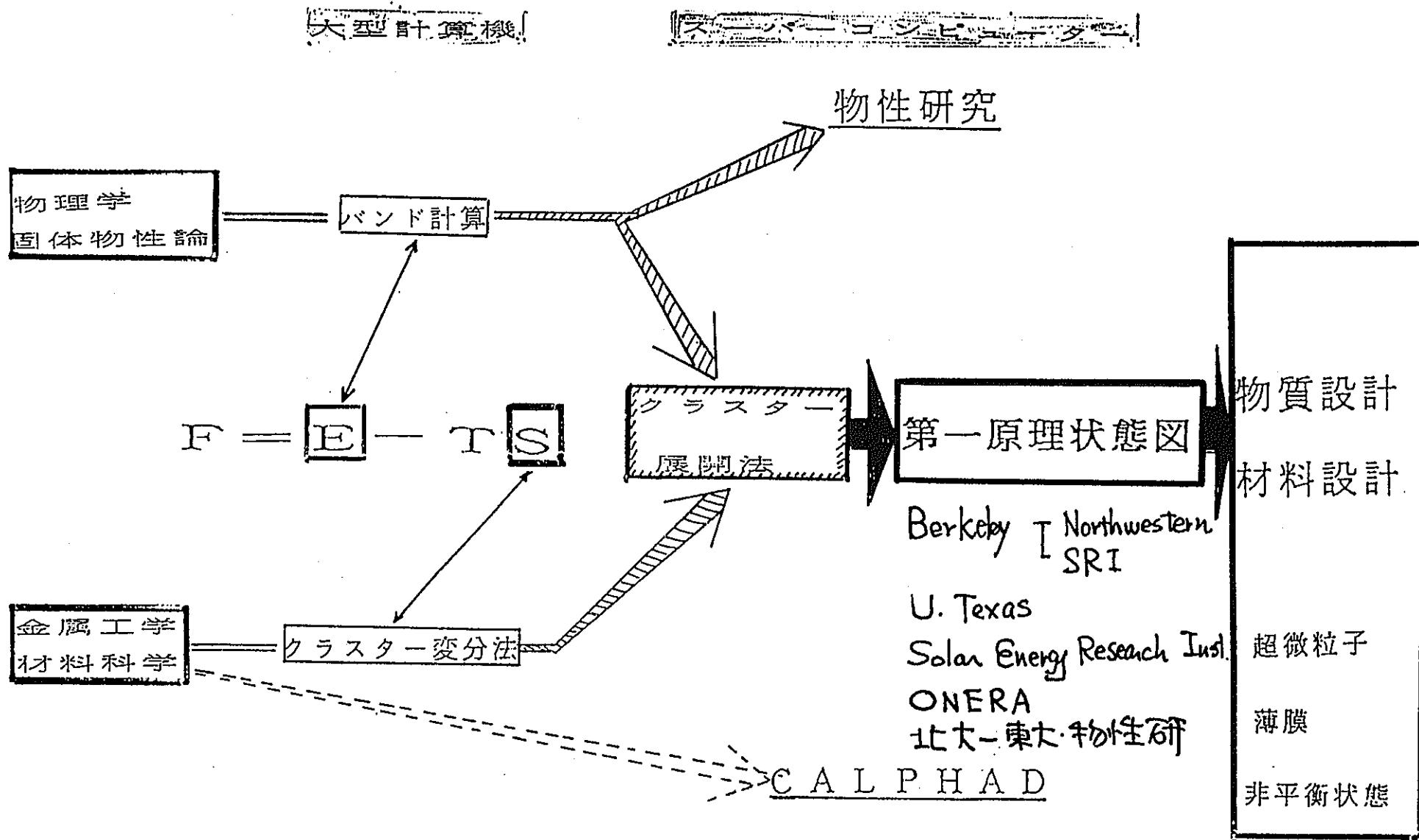
周 期 \ 族	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	7 A	8	1 B	2 B	3 B	4 B	5 B	6 B	7 B	0		
1	1 H															2 He		
2	3 Li	4 Be							5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
3	11 Na	12 Mg							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57~71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89~103															

*ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

表1 状態図に関する実験法と理論の進展

	実験	理論	関連事項
1850	Sorby; 光顯観察  Le Chatelier; 熱分析  Roberts-Austen; Fe-C系状態図	Mendeleiev; 周期律  Gibbs; 相律  Boltzmann; 統計力学	
1900	Campbell; マルテンサイトの X線解析  Bain; T-T-T図  Klinger-Koch; 微量介在相の分離 分析	Van Laar; 基本的 状態図の計算  Bragg-Williams モデル  Hume-Rothery; 合金則	Hansen; 状態図集  ENIAC(コンピュータ)始動
1950	Heidenreich; 透過電顕観察  Castain; EPMA  Fitzgerald; EDX	菊池良一; CVM  Hillert-Staffansson; 副格子モデル  Sanchez; 第一原理計算 Cr-Mo	IC 製造開始  Kaufman; CALPHAD 発足  Eriksson; SOLGASMIX  APDIC ; 状態図集
1986			
2000			

-1970 → 1980 → 1990



## 主なバンド計算法

分類	特徴	主な手法
第一原理的方法	第一原理からポテンシャルを組み立て、シュレディンガー方程式をセルフcontresントに解く。電子間多体相互作用は密度汎関数法により取り扱う。電子構造、全エネルギー、安定原子配列などの計算が可能。	(1)古典的方法： APW法、KKR法、OPW法 (2)線型化法： LAPW法、LMTO法、ASW法、pseudofunction法、FLAPW法 (3)擬ポテンシャル法： ノルム保存擬ポテンシャル法 (4)LCAO法： 第一原理的LCAO法、DV-X $\alpha$
半経験的方法	経験的パラメータを含むモデル・ハミルトニアンを用いて電子構造を計算する。バンド構造エネルギーにそれ以外の寄与を加えて全エネルギーや安定電子配列の計算も行なわれる。	(3)擬ポテンシャル法： 経験的ポテンシャル法 (4)LCAO法： tight-binding法

(1)～(4)はこれまでの発展の流れからの分類。なお、これら以外にバンド計算法を行いながら分子動力学計算を有効に行う方法としてCar-Parrinello法がある。

# 第一原理計算

$$E^{(n)} = \sum v_i \cdot \xi_i^{(n)}$$

where

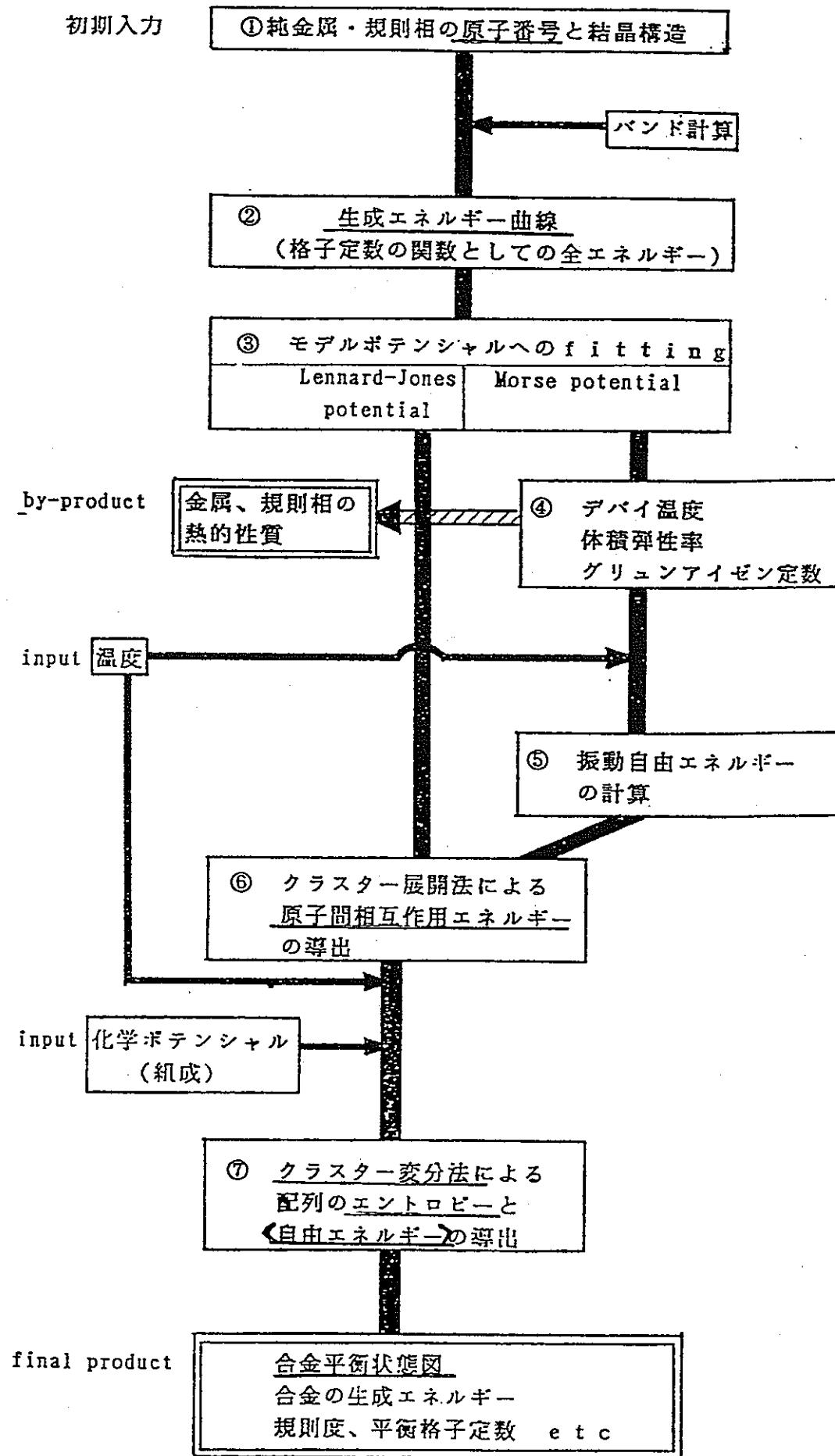
$E^{(n)}$  : 合金の内部エネルギー

$i$  : 結晶(あるいは相)nを構成する独立なクラスター

$v_i$  : クラスターを構成する原子の相互エネルギー

$\xi_i^{(n)}$  : 相関関数

初期入力



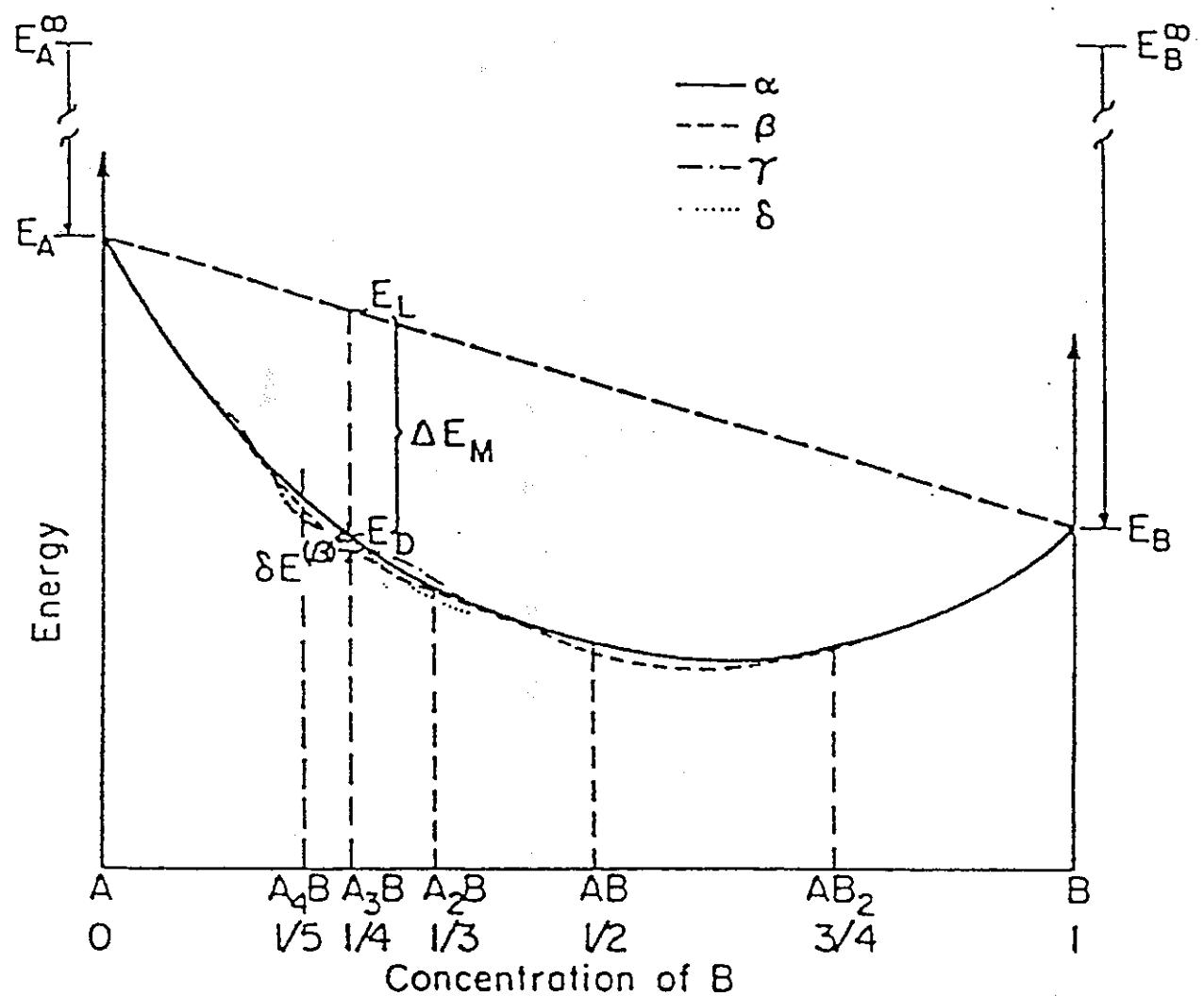


図1 合金における各種エネルギーの模式図<sup>(10)</sup>

純金属の凝集エネルギー

1 とすると

合金の混合のエネルギー

1/10~1/100

規則相に対する規則化のエネルギー

1/1000~1/10000

①

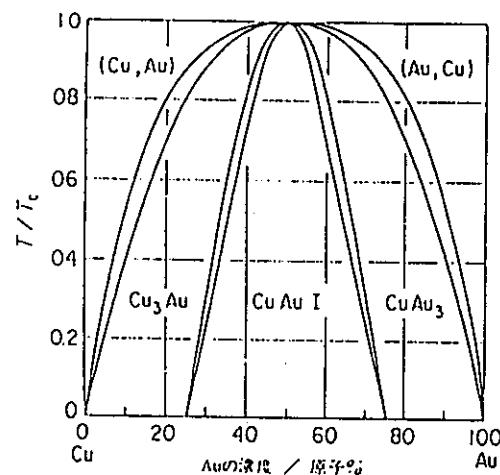


図 ブラッダ・ウィリアムズ近似による Cu-Au 2 元系のコヒーレント状態図(ショックレー<sup>(14)</sup>による)。

②

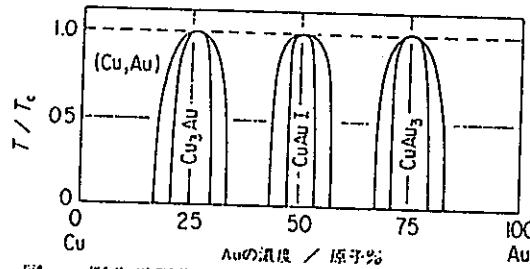


図 摂化学平衡法に4面体近似を用いて得られた Cu-Au 2 元系のコヒーレント状態図(Li<sup>(21)</sup>による)。

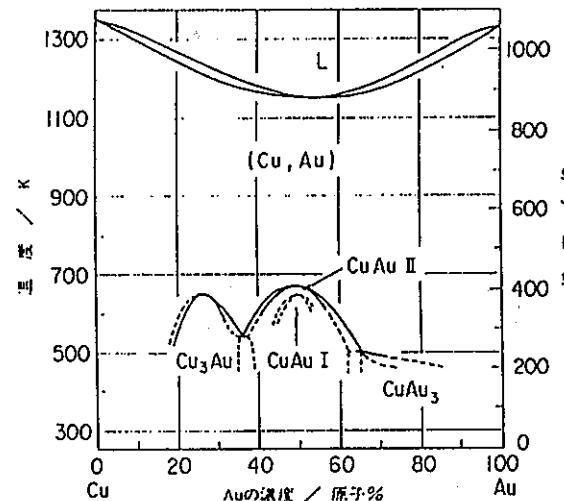


図 Cu-Au 2 元系の実験状態図(ハンセンら<sup>(19)</sup>による)。

③

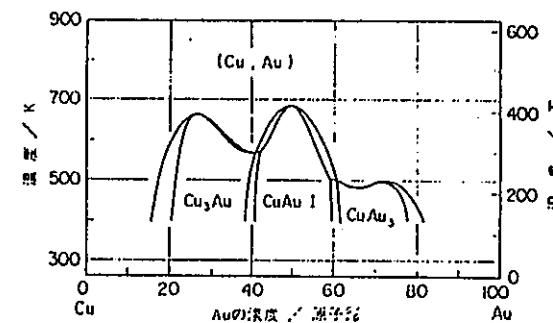


図 クラスター変分法に4面体近似を用いて得られた Cu-Au 2 元系のコヒーレント状態図。4面体相互作用エネルギーを考慮している(菊池ら<sup>(20)</sup>による)。

④

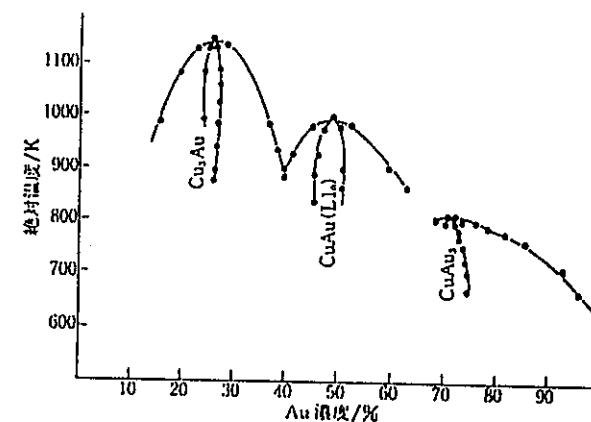


図 第一原理計算による Cu-Au 系平衡状態図。実験状態図と比べ Cu<sub>3</sub>Au の stoichiometry で約 500 K CuAu の stoichiometry で約 300 K 变態温度を overestimate している。逆に規則相単相領域は underestimate する。

# 原子および分子の相対論的取扱い

$$\text{Diracの式} \cdots \left( C \not{p} + \beta mc^2 + eV(r) \right) \Psi = E \Psi$$

ここで

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & \sigma \\ \sigma & 0 \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

$\sigma$ はパウリの $2 \times 2$ スピン行列

$I$ は $2 \times 2$ の単位行列

$$IP = -i\hbar\nabla \text{運動量演算子}$$

## 相対論的効果

### ① 相対論的収縮 (relativistic contraction)

$$a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/mze^2$$

### ② 相対論的無撞着膨張 (relativistic self-consistent expansion)

### ③ スピノ-軌道分裂

## 計算の複雑さ・求める量の不確かさ →

(○内数字は、1988-1992年間の総講演数)

	1. 直接的(微視的) イオン化ポテンシャル 結合次数 エネルギーレベルの差 状態密度	電子状態分布 波動関数 電荷移動 スピン分派 系の安定性	2. 二義的 分極率 各種モーメント 遷移確率	磁気モーメント バンド構造 X線吸収	3. 間接的 極度 耐熱性 (マクロな量) 延性 拡散	非晶質の構造 超伝導性 低温核融合 生体電子伝導系
A. 構造そのもの	④ X線スペクトル 89-16 KF, NaFのFK $\alpha$ の強度解析(橋-早大) 89-15 N-Nフェロセンの電子状態(安井) クラスター、分子	89-7 XPS	11 光吸收 木村氏のSIクラスター(発光) …スピン分派 89-14 シラン系分子の電子構造および光吸收 スペクトル計算(石川-富士通)	…	③	
B. 無限系 →有限系	⑨ X線スペクトル 89-16 KF, NaFのFK $\alpha$ サテライトスペクトルの強度解析(橋-早大) 89-17 共有性の強いフッ化物に対する多電子遷移状態の電子構造計算(日比野-早大) 89-19 光電子分光の強度の見積り(中松-阪大)…X線スペクトル 89-3 フラス-モデル風によるNa金属電子構造(茨木-早大) シリコン、超格子	89-18 XPS	③ …X線スペクトル …X線吸収 (バンド構造)	…	⑬ 89-8 CuOxクラスターの電子状態(岡根-東工大)…超伝導 89-2 金属性化合物のクラスターの計算(益水)…延性 森永先生のクラスター設計 89-18 非晶質FeBのクラスターの電子状態(伊藤-金研) 89-5 CaAs中のZnの電子状態(辻島-東芝)…拡散 89-11 空化物固体の電子状態(高田-阪大) 89-10 圧縮された金属性中水素の電子状態(足立) 89-4 超急速ガラス中の各種構造 単位の電子状態(小和田-兵教大) (伝導性)	
C. モデルその ものが不明確	⑨ 89-6 金属性化合物表面へのNa吸着(大西-東大)…電荷移動 89-10 圧縮された金属性中水素の電子状態(足立) (水素存在の安定性)	89-7 欠席	5	…	89-7 89-1 89-11 89-10 89-7 (生体の電子伝導系)	

図1 講演内容の分類：1989年度DV-X $\alpha$ 研究会

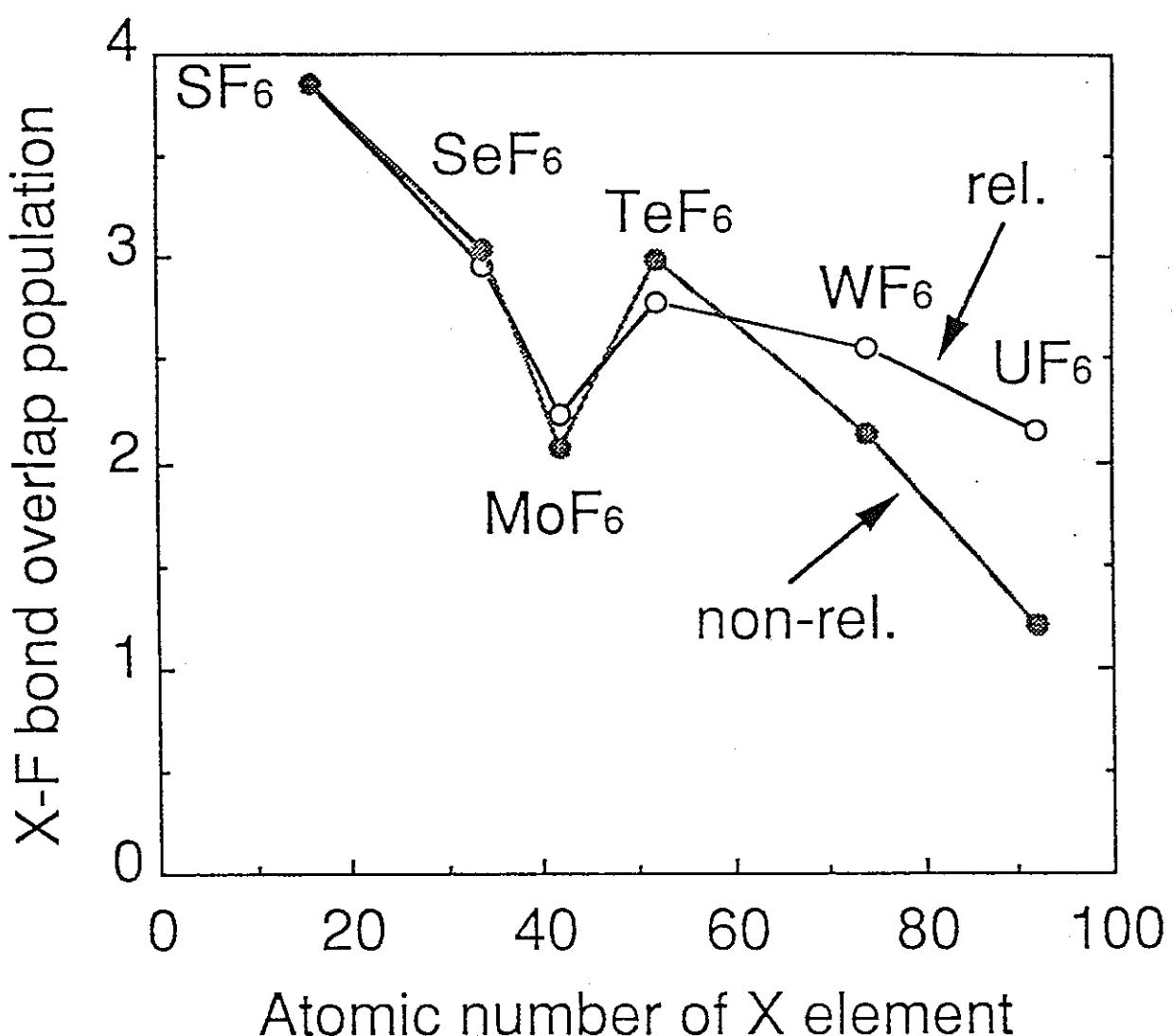


Fig.1. The Z-dependence of the bond overlap populations obtained by the non-relativistic DV-HFS and relativistic DV-DS methods for the hexafluoride molecules

## 新溶媒開発要件

- 1) アクチニドイオンに対する選択抽出性が高いこと。
- 2) 硝酸をベースとした溶媒抽出プロセスに適合すること。
- 3) 抽出能力が十分高く、塩析剤（硝酸以外）の併用が必要であること。
- 4) 逆抽出が容易であること。
- 5) 装荷度が高いこと。第三相が生じないこと（抽出錯体の溶解度が高いこと）。
- 6) 安定性（化学的、及び対放射線）が優れていること。
- 7) エマルジョンの早急な沈降・相分離に必要な物理的性質（比重、表面張力及び粘性を有すること）。
- 8) 水相中への溶解度が低いこと。
- 9) 振発性が低く、さらに引火点が高いこと。爆発性でないこと。

- 10) 有害でないこと。
- 11) ステンレス銅などの装置材に対し腐食性でないこと。
- 12) 合成及び精製が容易で低コストであること。
- 13) 溶媒劣化物は洗浄可能であること（溶媒のリサイクル使用が可能のこと）。
- 14) 廃棄処分が容易であること（分解が可能であることが望ましく、その際有害な物質を生成しないこと）。
- 15) 抽出分離に塩析剤、錯化剤及び還元剤の併用が必要な場合は、それらが二次廃棄物の発生をもたらさないこと（分解が可能であることが望ましい）。
- 16) 希釀剤との混合使用が必要な場合、希釀剤についても5) ~14) を満足するものであること。

FTMS 1/16/92

CMPO+Nd

compnd. 005

LD-

-14-

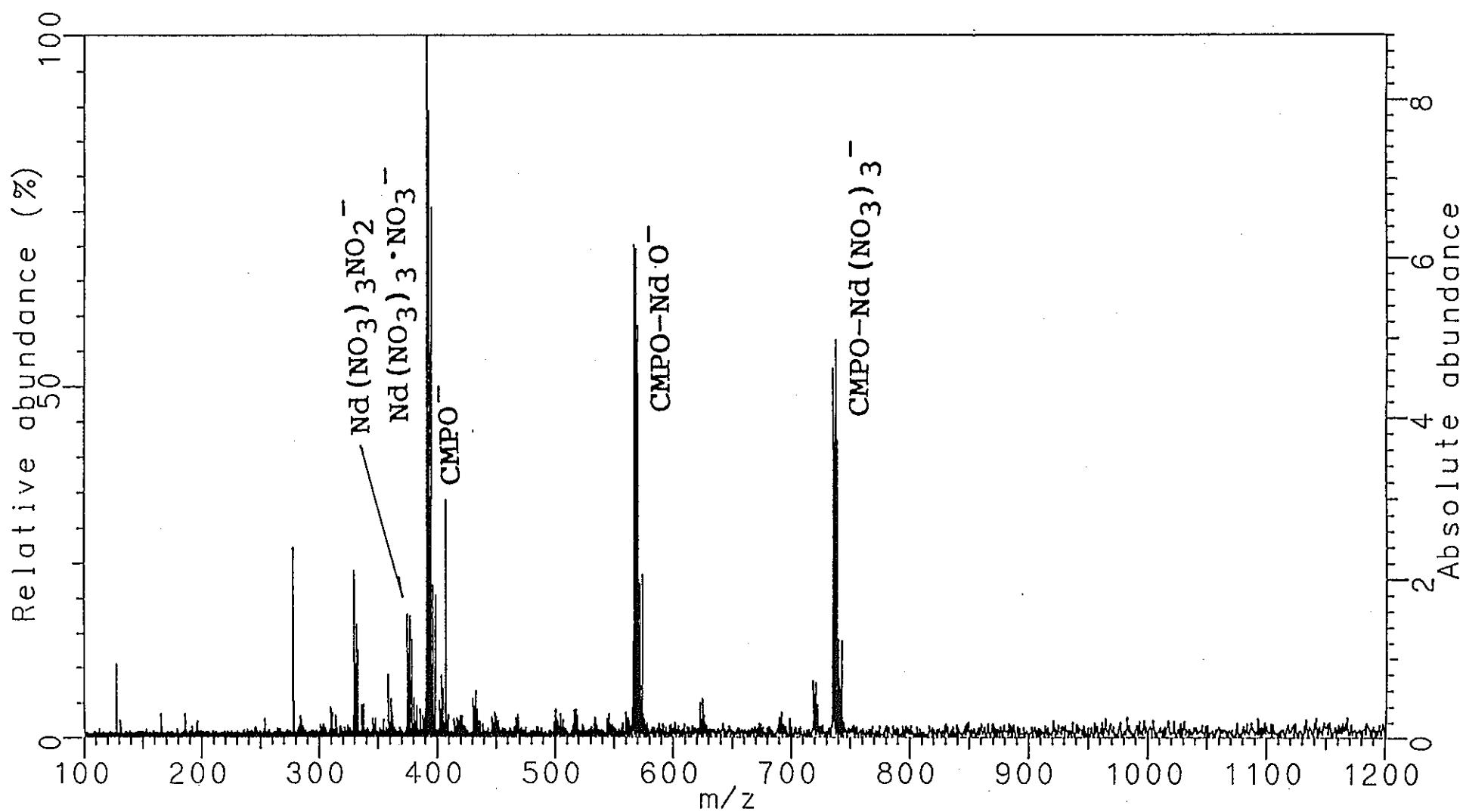


図 2 CMPO + Nd の ICR 分析結果 (負イオン)

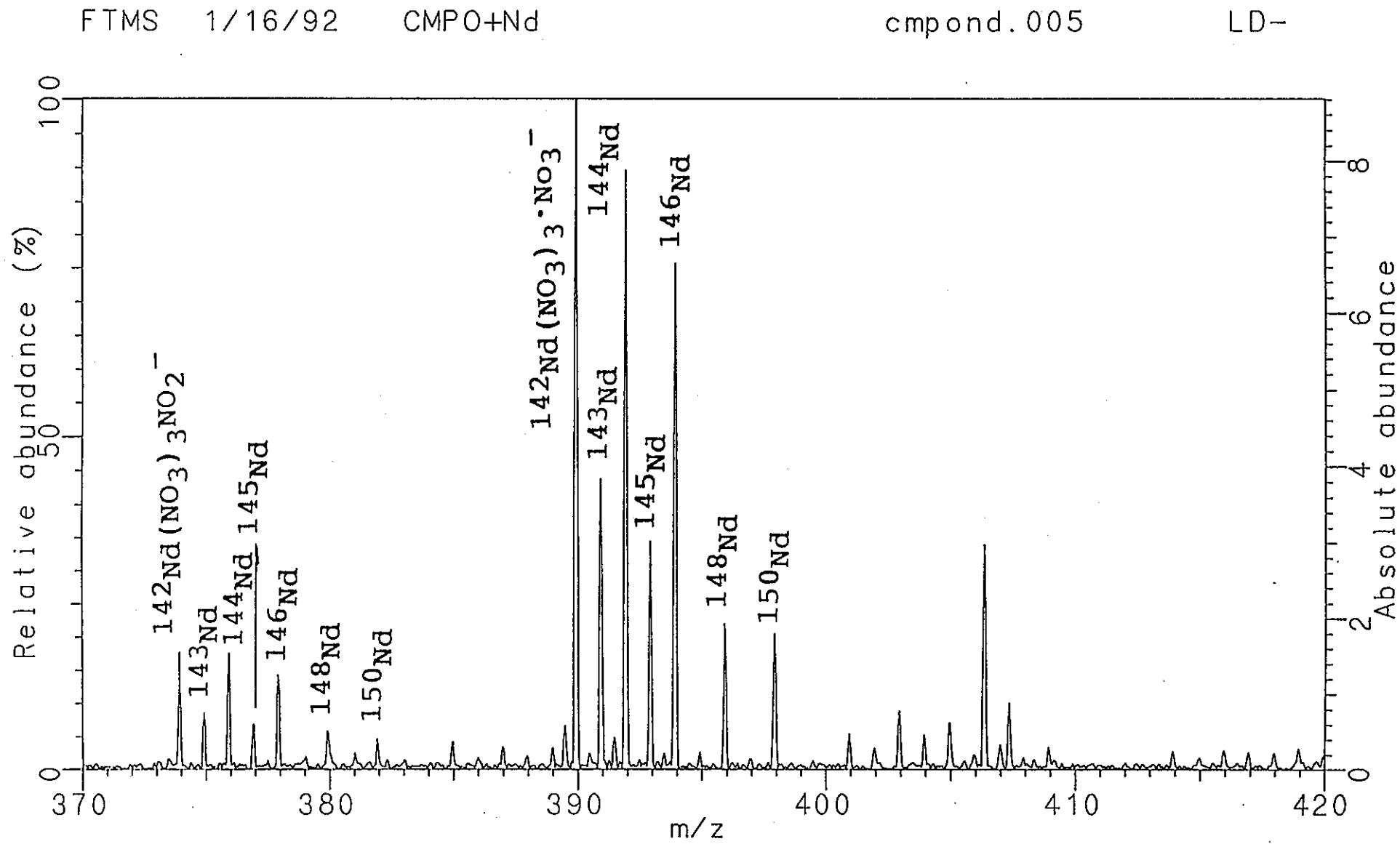


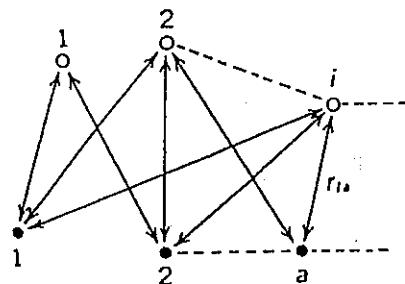
図 3 CMPO + Nd の ICR 分析結果 (負イオン) m/z=370~420 の拡大

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} \right) - \sum_{i=1}^n \sum_{a=1}^N \frac{Z_a e^2}{r_{ia}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \frac{e^2}{r_{ij}} \right] \psi = E \psi \quad (1)$$

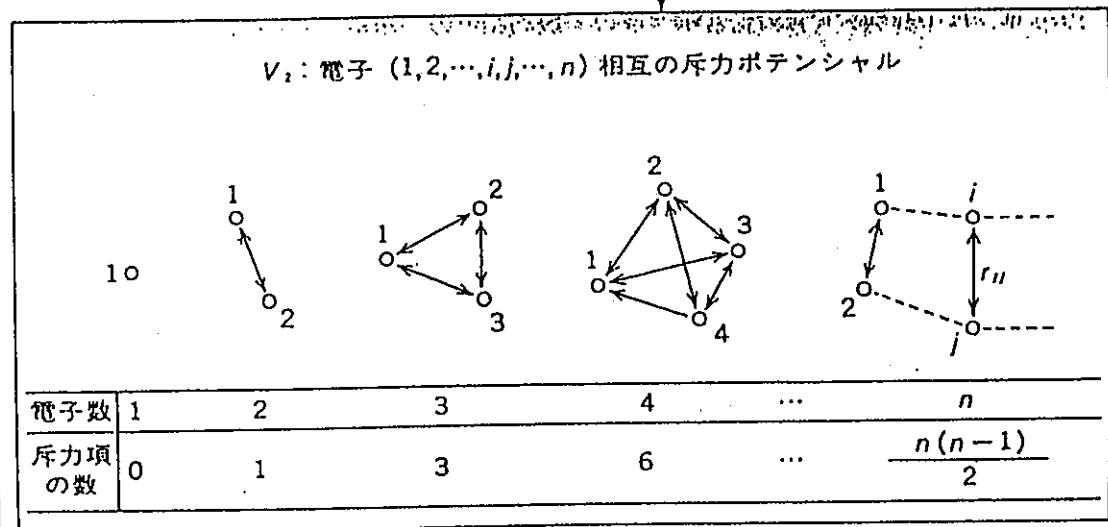
$T = \sum_{i=1}^n T_i$  (運動エネルギー項)

$V = V_1 + V_2$  (ポテンシャルエネルギー項)

$V_1$ : 電子 (○印,  $1, 2, \dots, i, \dots, n$ ) と核 (●印,  $1, 2, \dots, a, \dots, N$ ) の引力ポテンシャル



$V_2$ : 電子 ( $1, 2, \dots, i, \dots, n$ ) 相互の斥力ポテンシャル



$N$  個の原子核 ( $a$  番目の核の電荷  $Z_a e$ ) と  $n$  個の電子 (電荷  $-e$ ) から成る分子の Schrödinger の波動方程式 (1) と、各項の意味

## 分子軌道法の分類

方法	名称	考慮する電子	特徴・対象
経験的	FEM (free electron model) HMO (Hückel molecular orbital) EHMO (extended HMO)	π電子 π電子 全価電子	MOの定性的理解 MOの定性的理解 結合電子分布など
半経験的	PPP (Pariser-Parr-Pople) CNDO (complete neglect of differential overlap) INDO (intermediate neglect of differential overlap) MINDO (modified INDO) MNDO (modified neglect of diatomic overlap)	π電子 全価電子 全価電子 全価電子 全価電子	励起エネルギー 双極子能率など 電子スピン密度など 平衡構造など 平衡構造など
非経験的	ab initio (from the beginning の意)	全電子	反応機構など

事前研究評価資料

[原子力基盤クロスオーバー研究]

研究題目:電子線形加速器による陽電子生成

平成 6 年 1 月 25 日

動燃事業団・大洗工学センター  
先進技術開発室

武井 早憲

## はじめに

### 陽電子ビームの特徴

- 1 消滅 $\gamma$ 線が種々の情報(電子の運動量・エネルギー、電子密度、消滅位置)を伝播する。
- 2 消滅位置を陽電子入射エネルギーにより制御できるので、特定位置の電子構造を解析できる。
- 3 低速陽電子を用いることで表面近傍の解析が可能。
- 4 電子と対消滅することによりイオン化できる。
- 5 電子と比較して貯蔵し易い(残留ガスによる捕獲が少ない)

### 大電流陽電子ビームの必要性

- 1 光子(X線)や電子、中性子などの粒子ビームだけでは情報が得られなかつた物質・材料の微視的構造・状態解析が短時間に行える。
- 2 DNA損傷機構の解明、反物質(反水素)生成等の基礎物理学、化学、生物学の新展開に多大の寄与が期待される。

## 陽電子ビームの現状

### 1 RI 線源の利用

$^{22}\text{Na}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 等の陽電子源を利用  
減速材に照射し低速陽電子を得る  
ビーム強度  $10^6 \sim 10^7$  個／秒  
大電流化に問題がある

### 2 電子加速器の利用

TaブロックとW減速材を用いる

ビーム強度  $\sim 10^8$  個／秒 (入射電子電力:  $\sim 30\text{ kW}$ )  
(国内)  $\sim 10^7$  個／秒 (入射電子電力:  $\sim 5\text{ kW}$ )

## 本研究で目標とする陽電子ビーム

ビーム強度  $10^8$  個／秒以上  
入射電子電力  $40\text{ kW}$ 以上  
エネルギー keV～MeV  
→ 陽電子チャネリング  
陽電子顕微鏡

→ 大電流陽電子源の開発を主目的に行う

(減速材等の開発は除く)

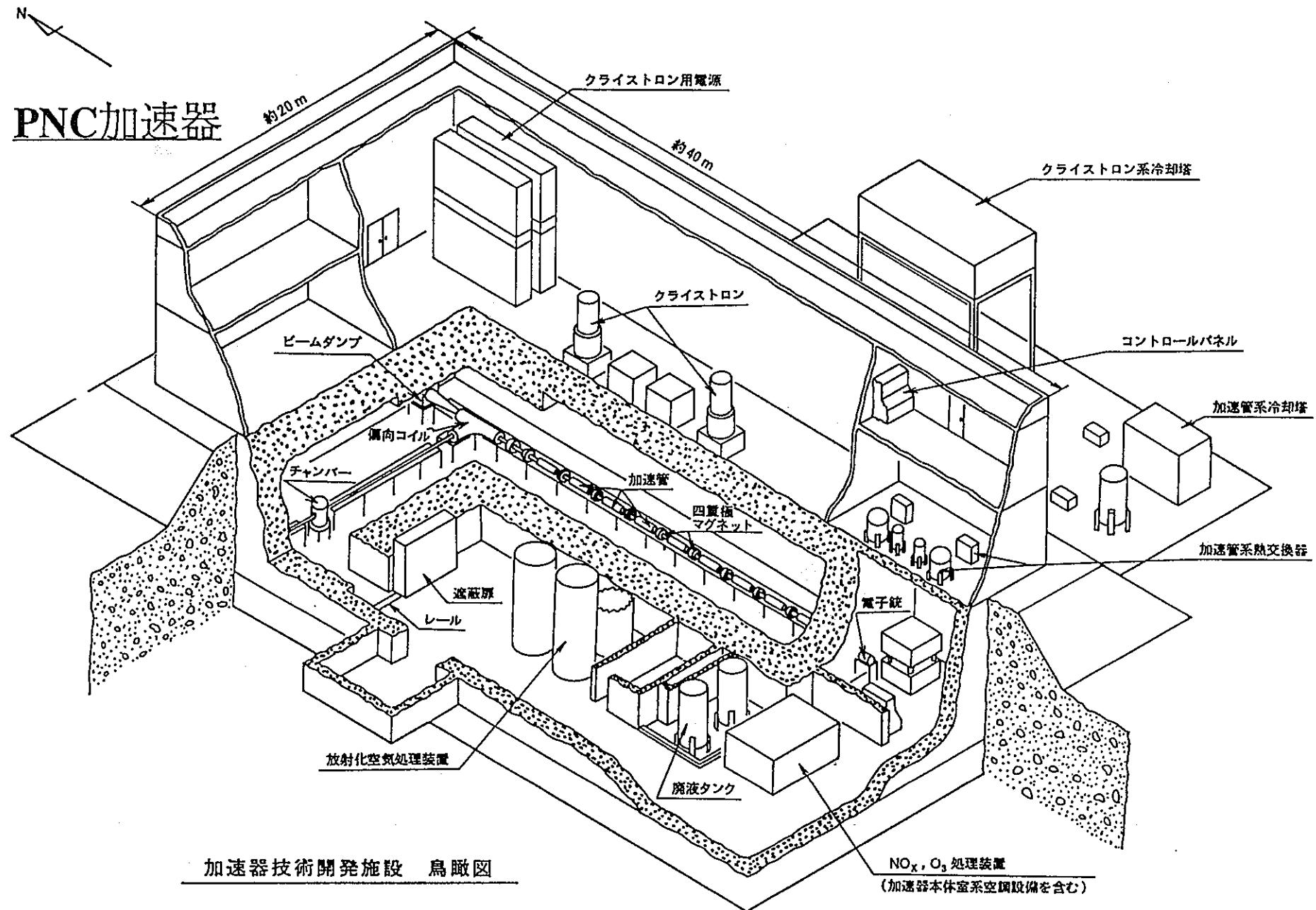


表 1. P N C 加速器システムの仕様

項 目	仕 様
エネルギー	1 0 M e V
最大 / 平均電流	1 0 0 / 2 0 m A
パルス長	4 m s
繰り返し周波数	5 0 H z
ビーム出力	2 0 0 k W
R F 周波数	1 2 4 9 , 1 3 5 M H z
加速モード	2 $\pi$ / 3
加速管構造	進行波管型 準定電場型
クライストロン基數	2 基
クライストロン出力	1. 2 MW (1基あたり最大)
全長	約 1 6 m

## 開発目的

1. 大電流電子加速器の特徴を生かした大電流陽電子源(標的・収集・輸送系)の開発を行う。

利点

- 大電流陽電子ビームが生成可能
- 放射線汚染対策が比較的容易  
(中性子発生しない)

開発課題

- 熱除去
- 効率の良い陽電子収束系・輸送系の開発  
(**10 MeV**での陽電子発生効率が小さい)

2. 陽電子数として **10<sup>8</sup>** 個/秒以上を目指す。

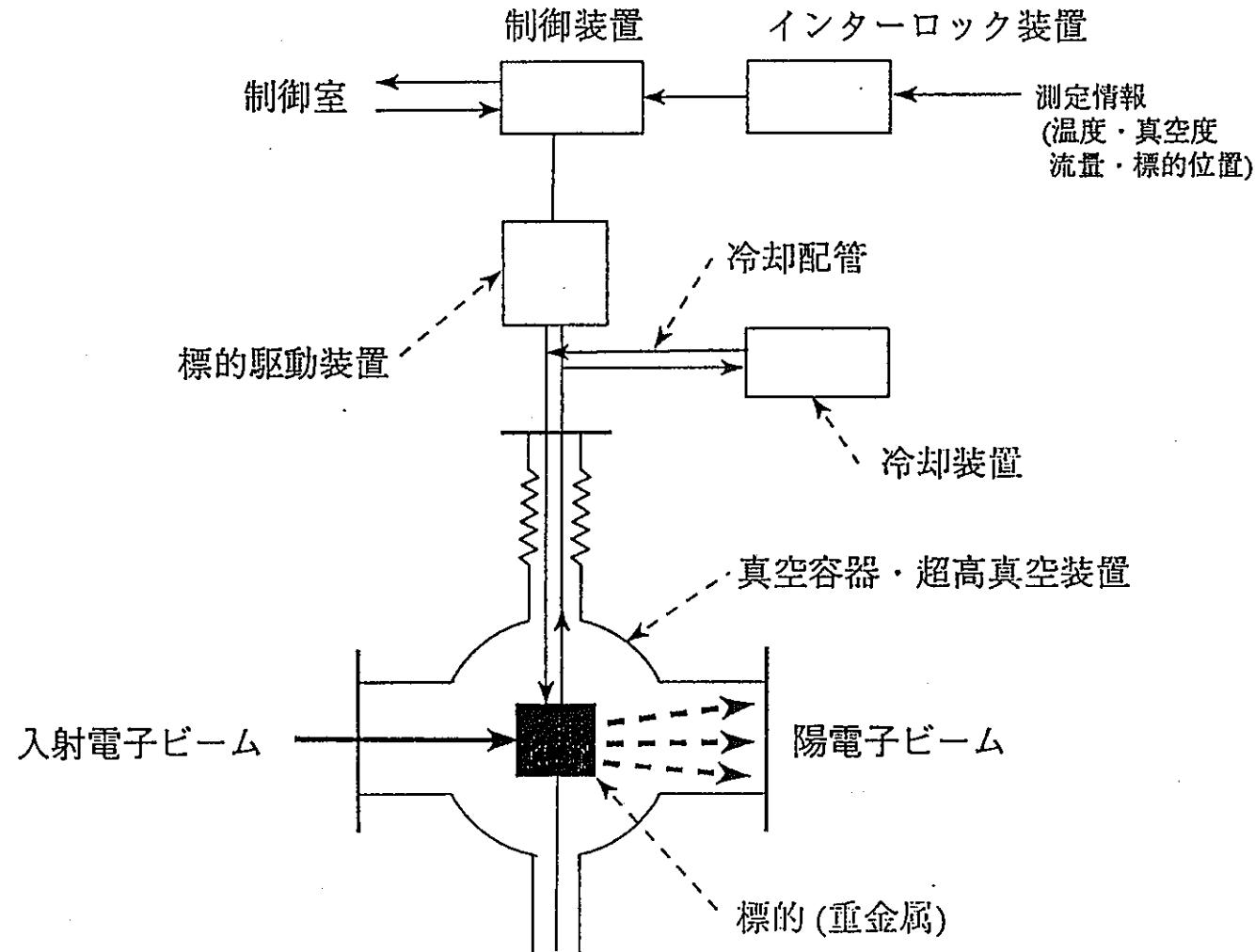
# 開発計画

計算コードを用いた設計計算(内部実施)及び試作・試験(外部実施)を行う

No	項目	年 度	当該評価対象期間					
			右以前	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10
(1)	陽電子標的の研究			○	○	○		
(2)	標的部収束系の研究				○	○	○	
(3)	陽電子輸送系の研究					○	○	○
							△	

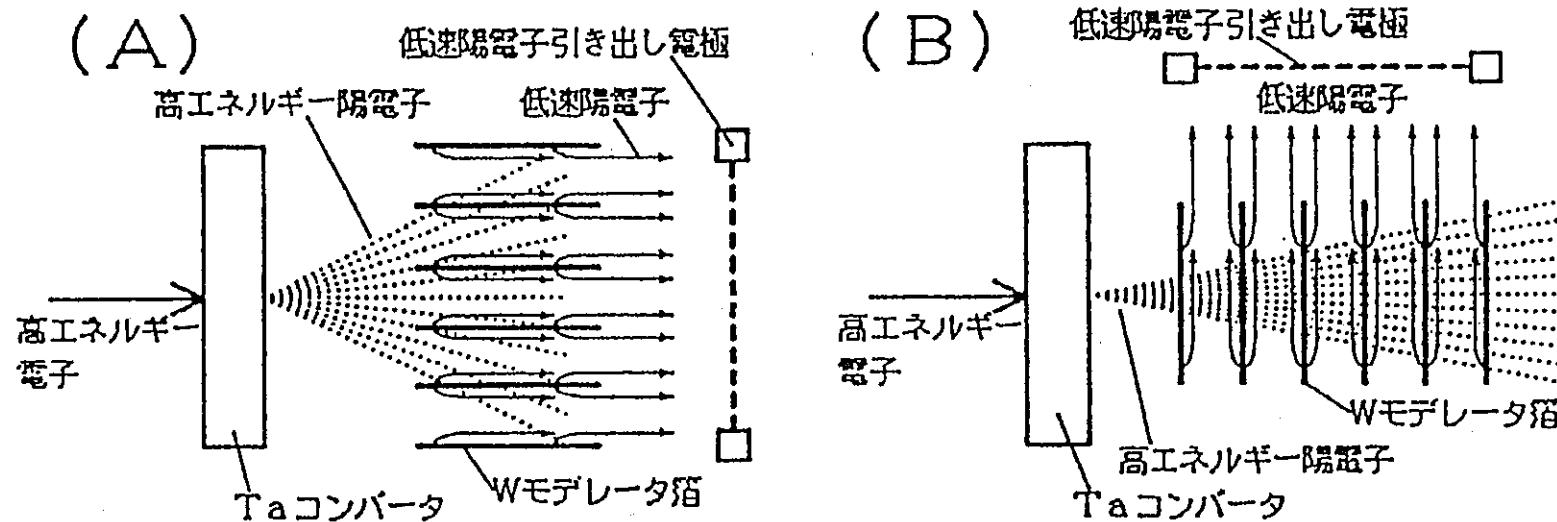
## 標的系概念図

大電流電子ビームから大電流陽電子ビームを発生する標的系を開発する  
計算コード(EGS4、ALGOR等)の使用



# 収束系概念図

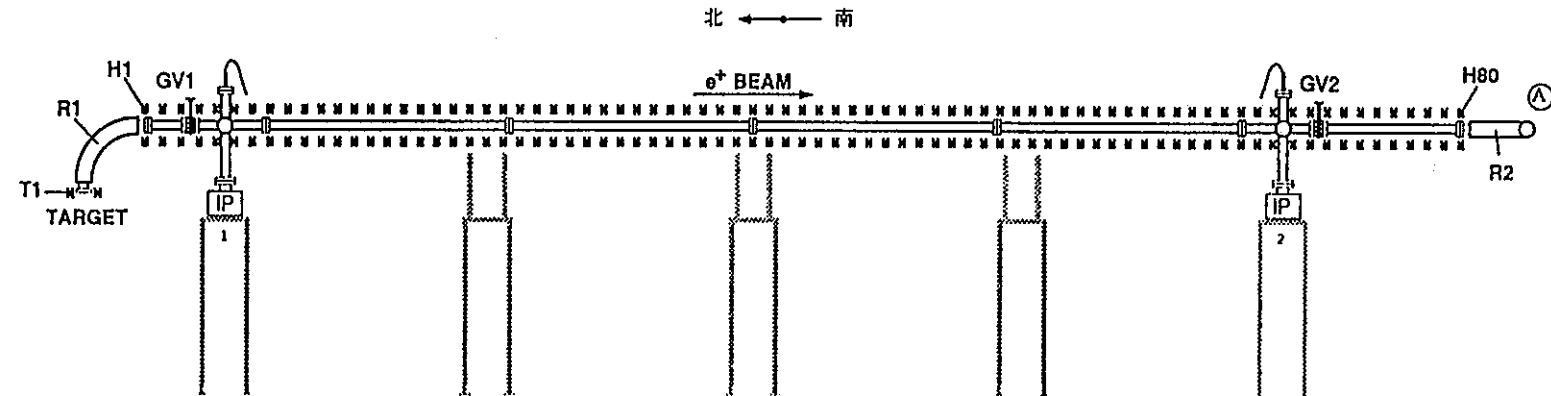
大電流陽電子ビームをkeV～MeVの領域に形成する収束系を開発する  
計算コード(EGS4-SPG等)の使用



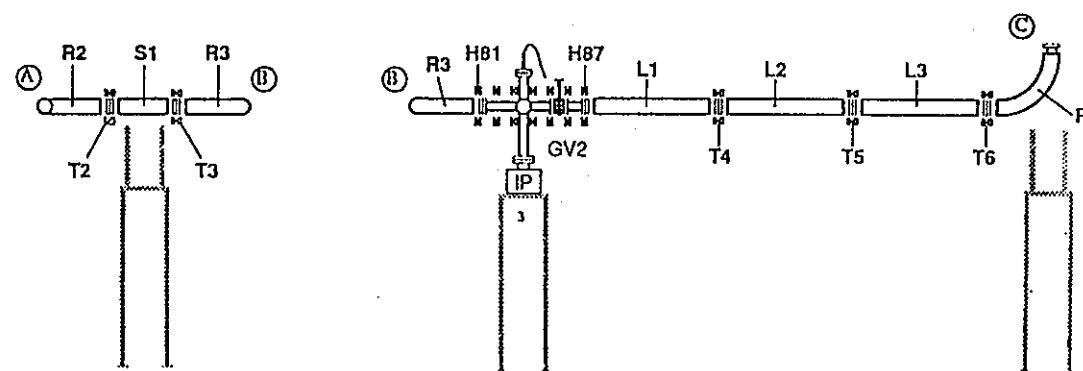
# 輸送系概念図

形成された大電流陽電子ビームを損失することなく数十メートル輸送するための高真空ビーム輸送系を開発する

計算コード(PARMELA等)の使用・差動排気系の検討



東 ← → 西



# 生成陽電子数の目標

生成効率の試算



EGS4 & ALGOR

EGS4による陽電子生成に関する基礎計算

1. 標的 : Ta 板

厚さ

0.5 mm

( $0.5 X_0$ ) for 10 MeV e-

8.0 mm ( $2 X_0$ ) for 100 MeV e-

Cut Off Energy

$e^+e^-$  0.1 MeV for 10 MeV e-

1 MeV for 100 MeV e-

$\gamma$  10 keV

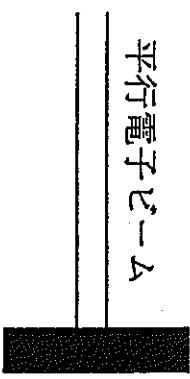
2. 入射電子ビーム : 200 kW

3. 入射電子形状: 2通り

(a) 10 MeV 20 mA

$\phi 5$

平行電子ビーム

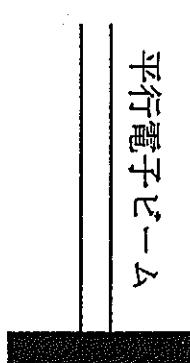


Ta 板

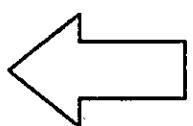
(b) 100 MeV 2 mA

$\phi 5$

平行電子ビーム



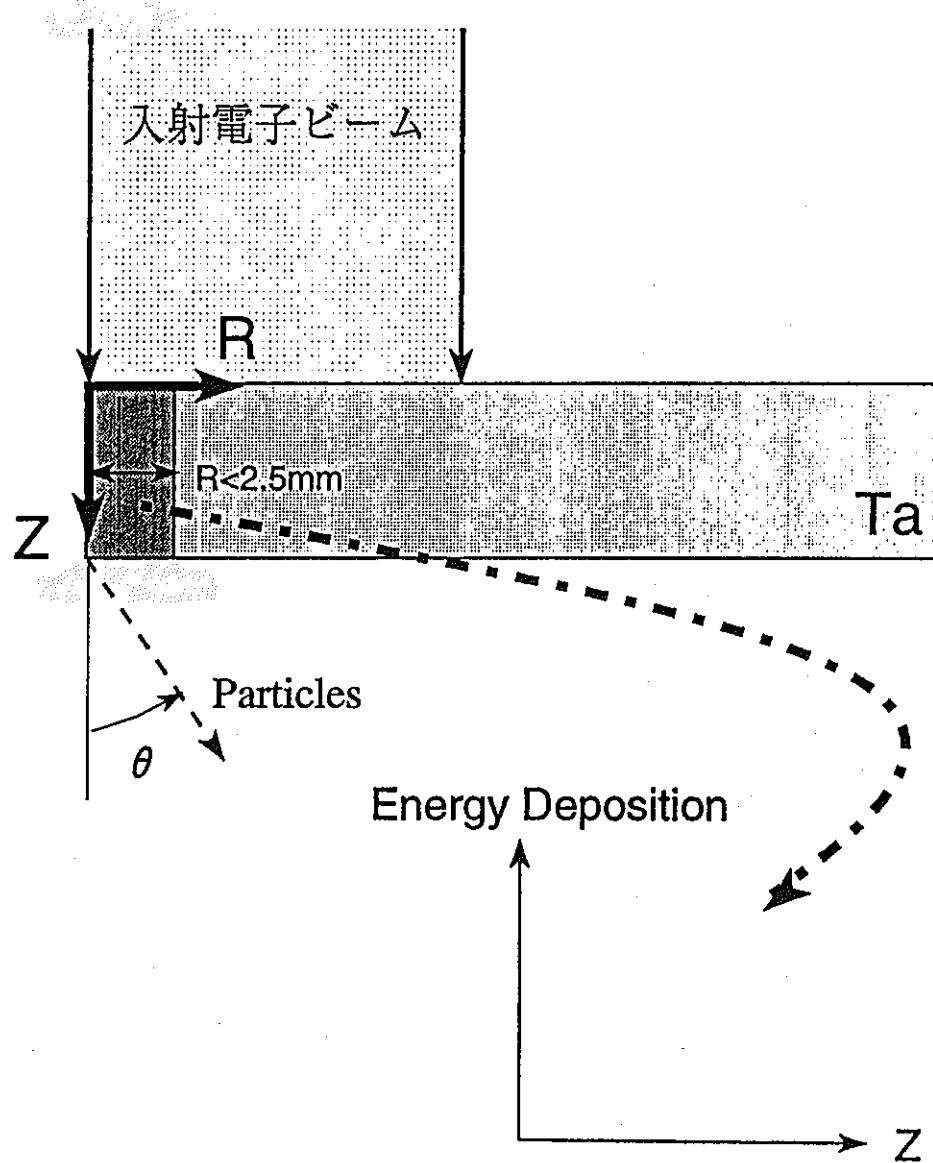
Ta 板



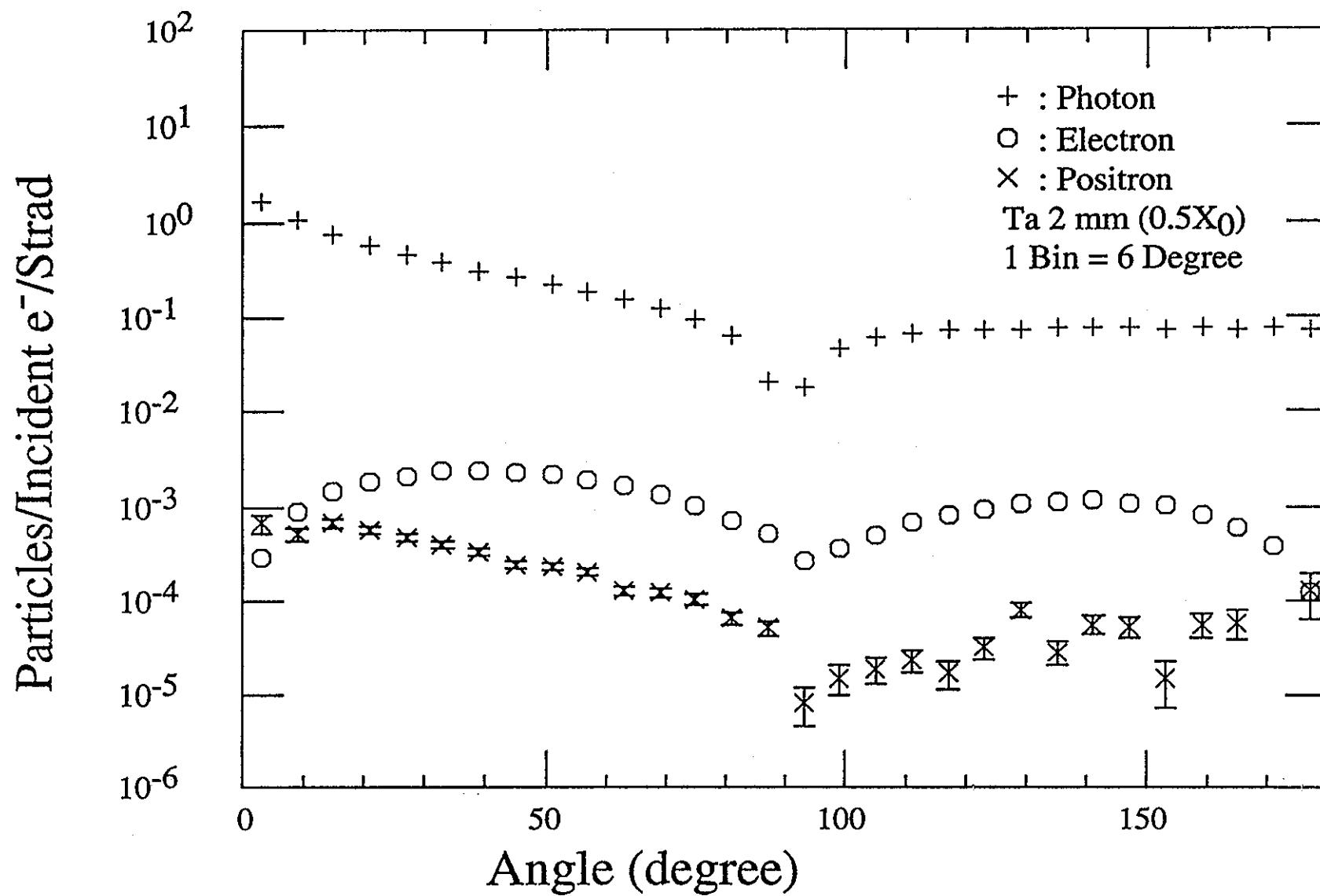
計算結果

1. 発熱分布 (Ta 板)
2. 発生粒子 ( $e^+e^- \gamma$ ) の角度分布
3. 陽電子のエネルギー分布

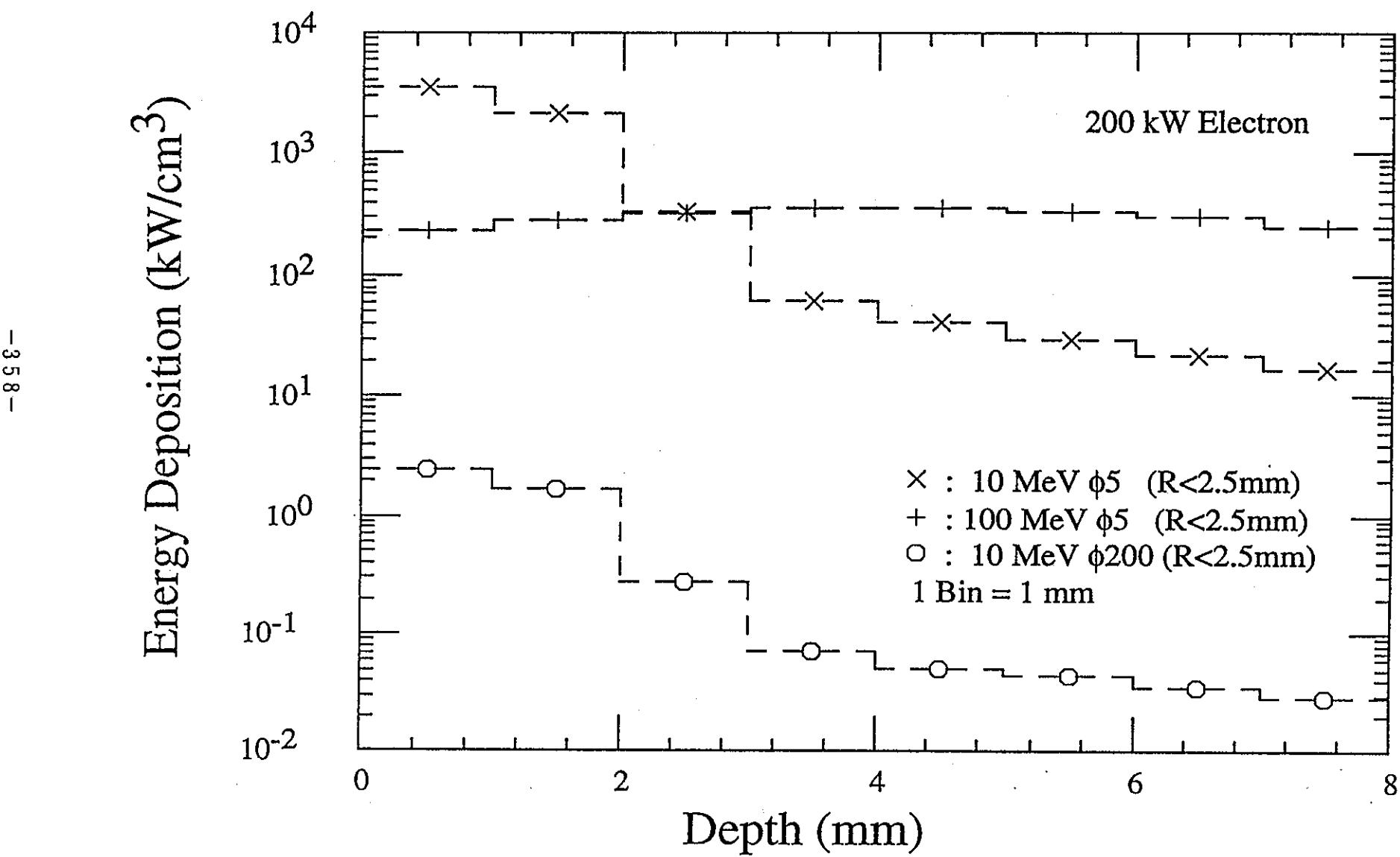
## EGS4 計算形状



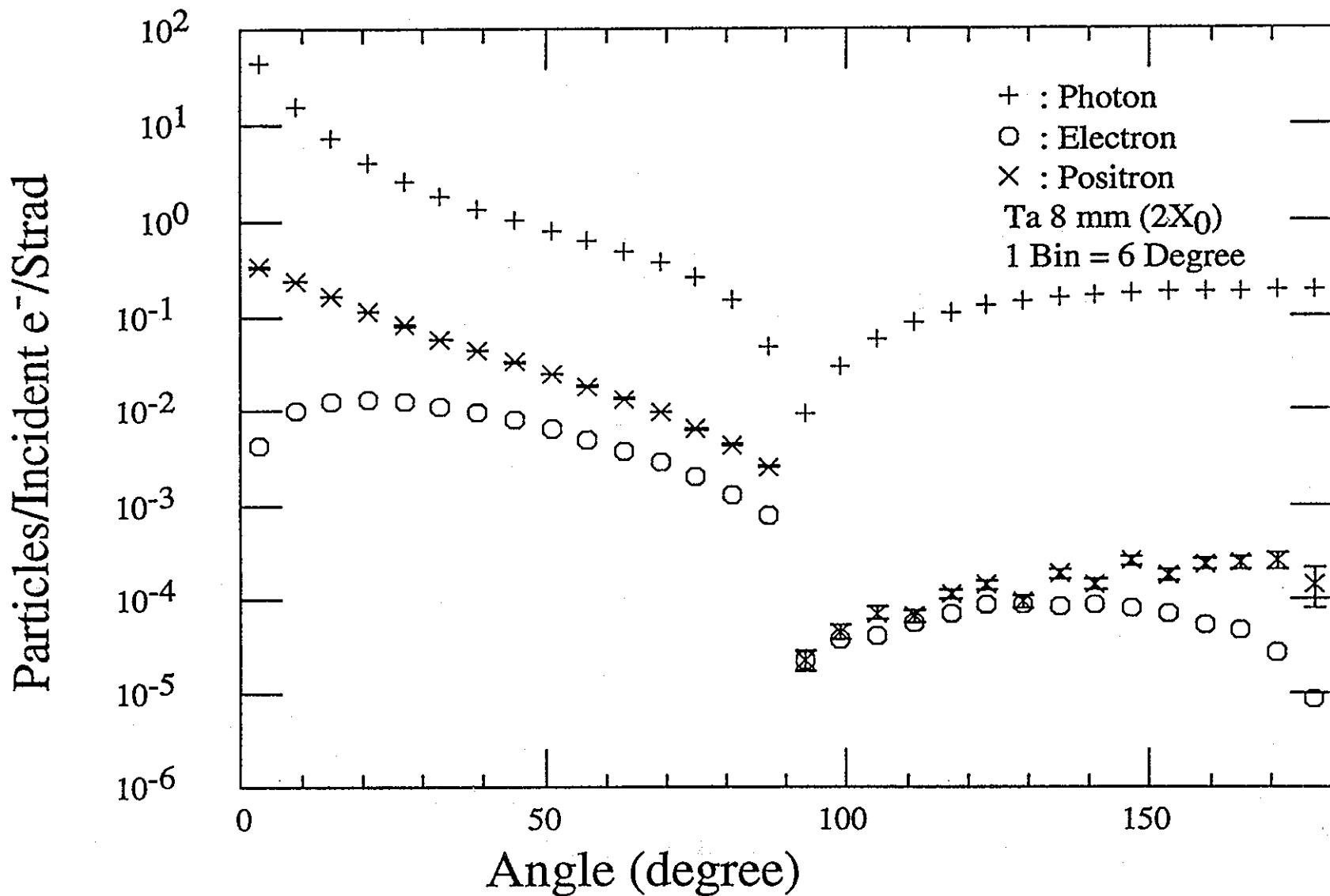
# Angle Dist. (10 MeV $\phi$ 5)



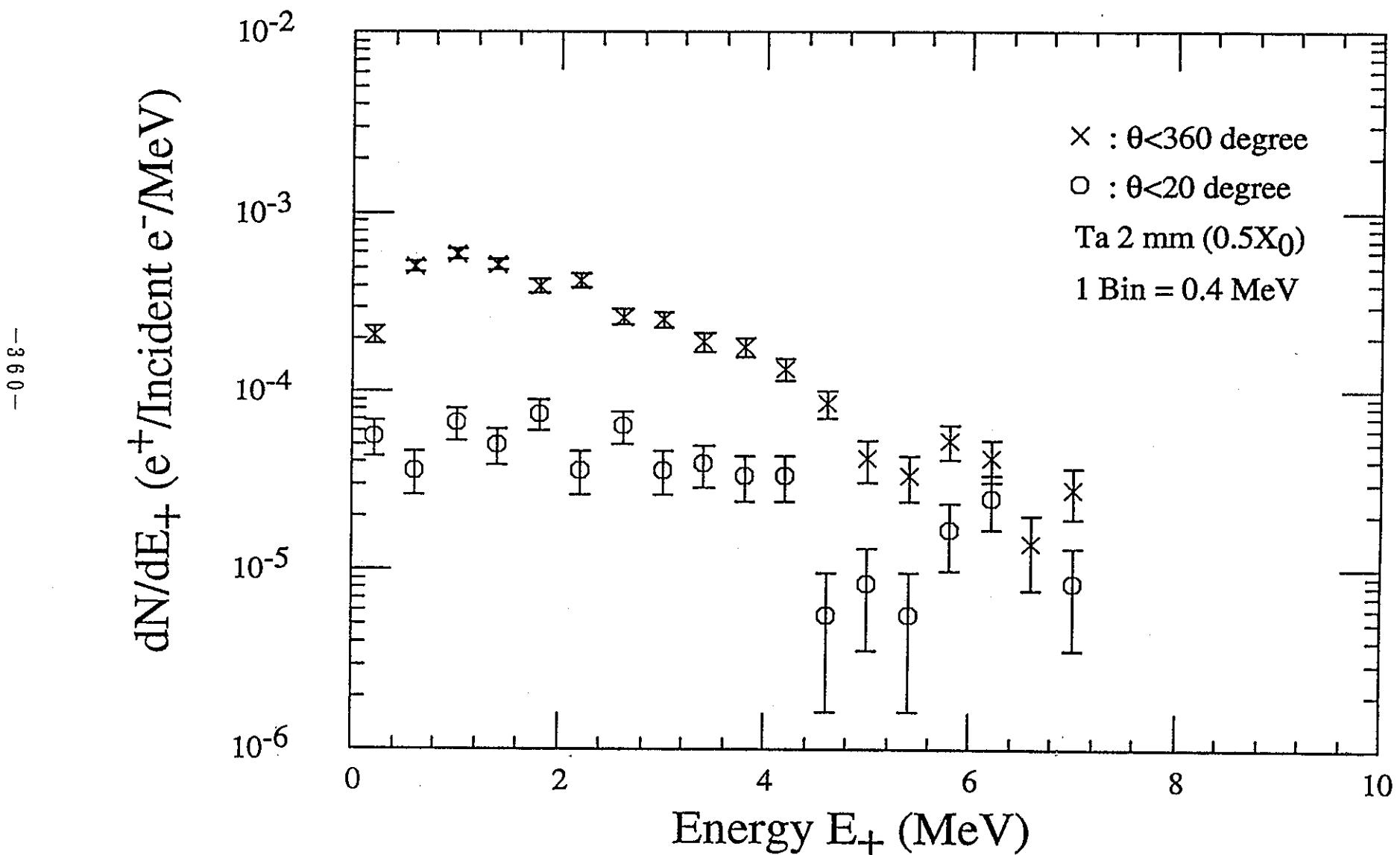
# Energy Deposition in Ta Plate



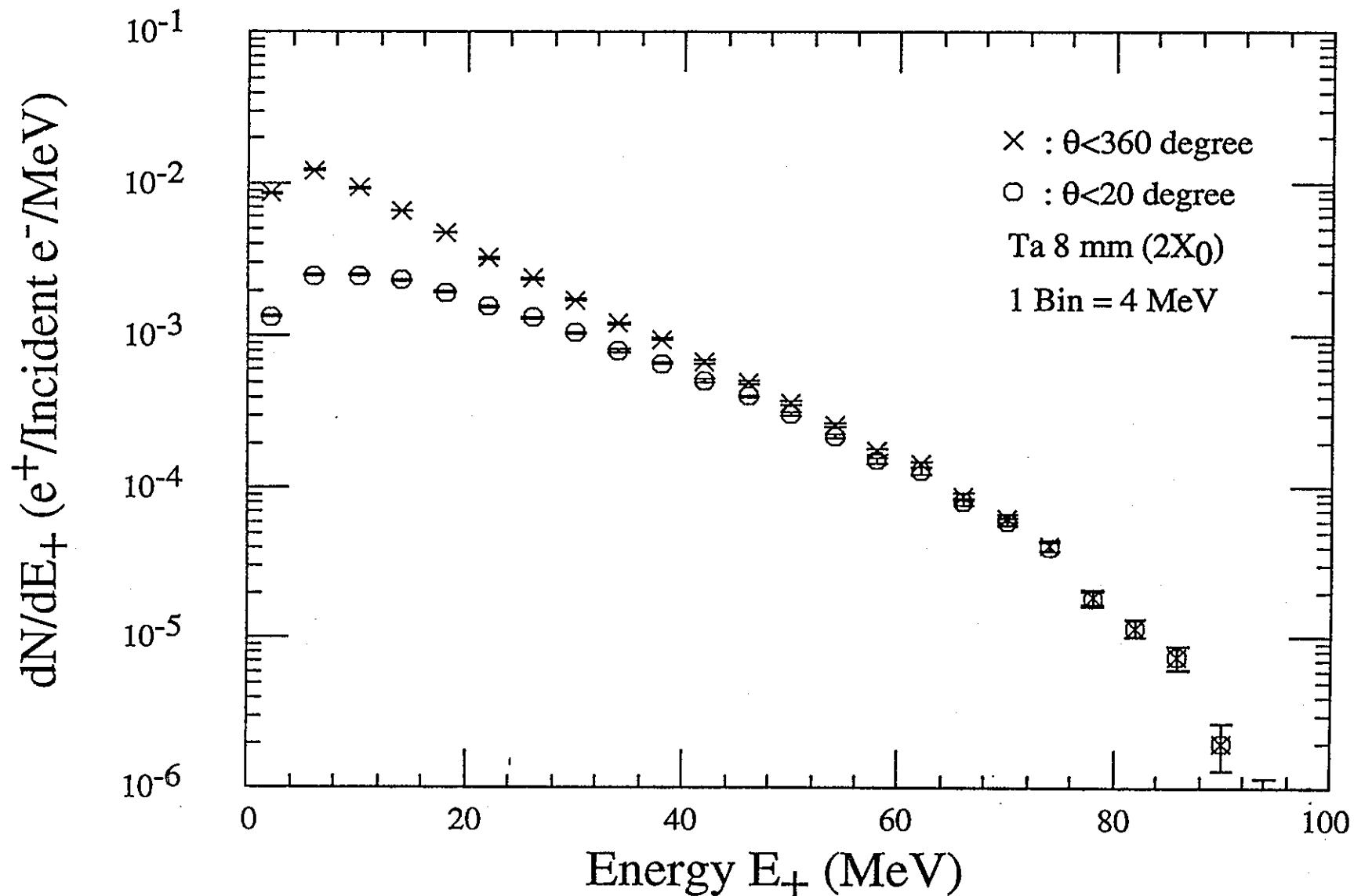
# Angle Dist. (100 MeV $\phi$ 5)



# Positron Energy Dist. (10 MeV $\phi$ 5)



# Positron Energy Dist. (100 MeV $\phi$ 5)



## EGS4計算結果

入射電子電力200 kWの場合

エネルギー	ビーム径	発生陽電子数	
		全方向・全エネルギー	$\theta \leq 20^\circ$ & $E \leq 4\text{MeV}$
10 MeV	$\phi 5\text{ mm}$	$2.0 \times 10^{14}$ 個／秒	$2.5 \times 10^{13}$ 個／秒
100 MeV	$\phi 5\text{ mm}$	$2.7 \times 10^{15}$ 個／秒	$6.8 \times 10^{13}$ 個／秒

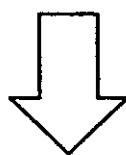
# ALGORによる冷却に関する基礎計算

ALGOR : DEC PC (DOS/V) で動く熱・応力解析用ソフト

1. 標的 : Ta 板

2. 冷却方式 : Ta 板周辺部に冷却配管を設置する。

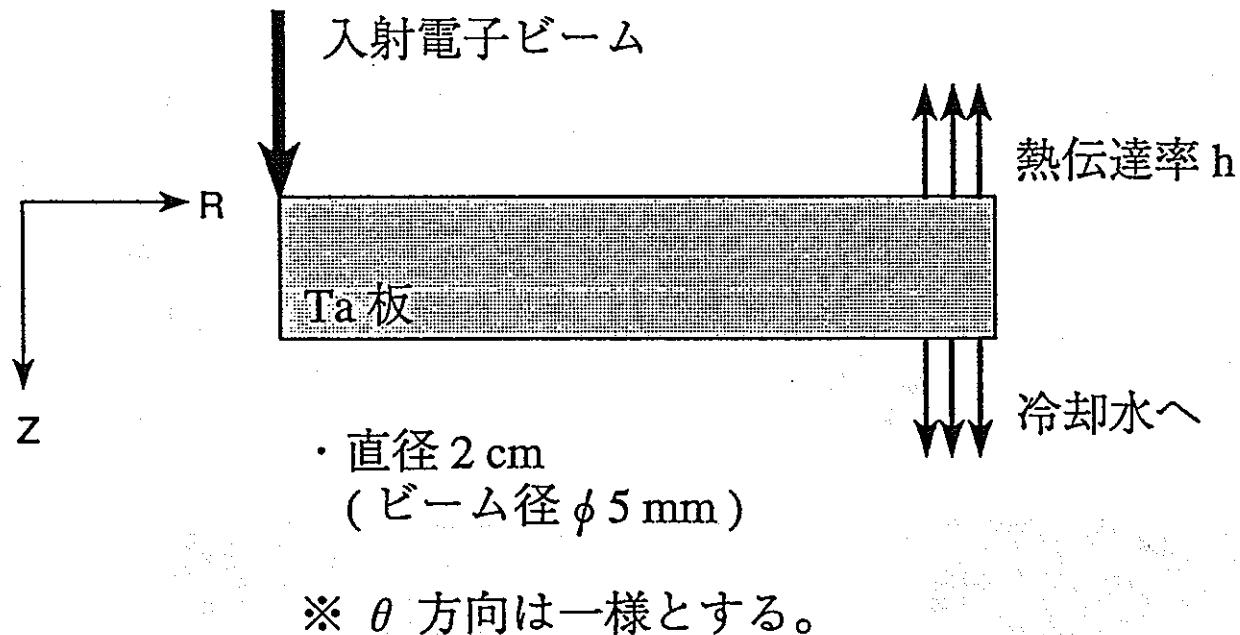
冷却水条件 : 内径 1.5 cm の配管2本に 100 ℓ/min  
の冷却水を流す。



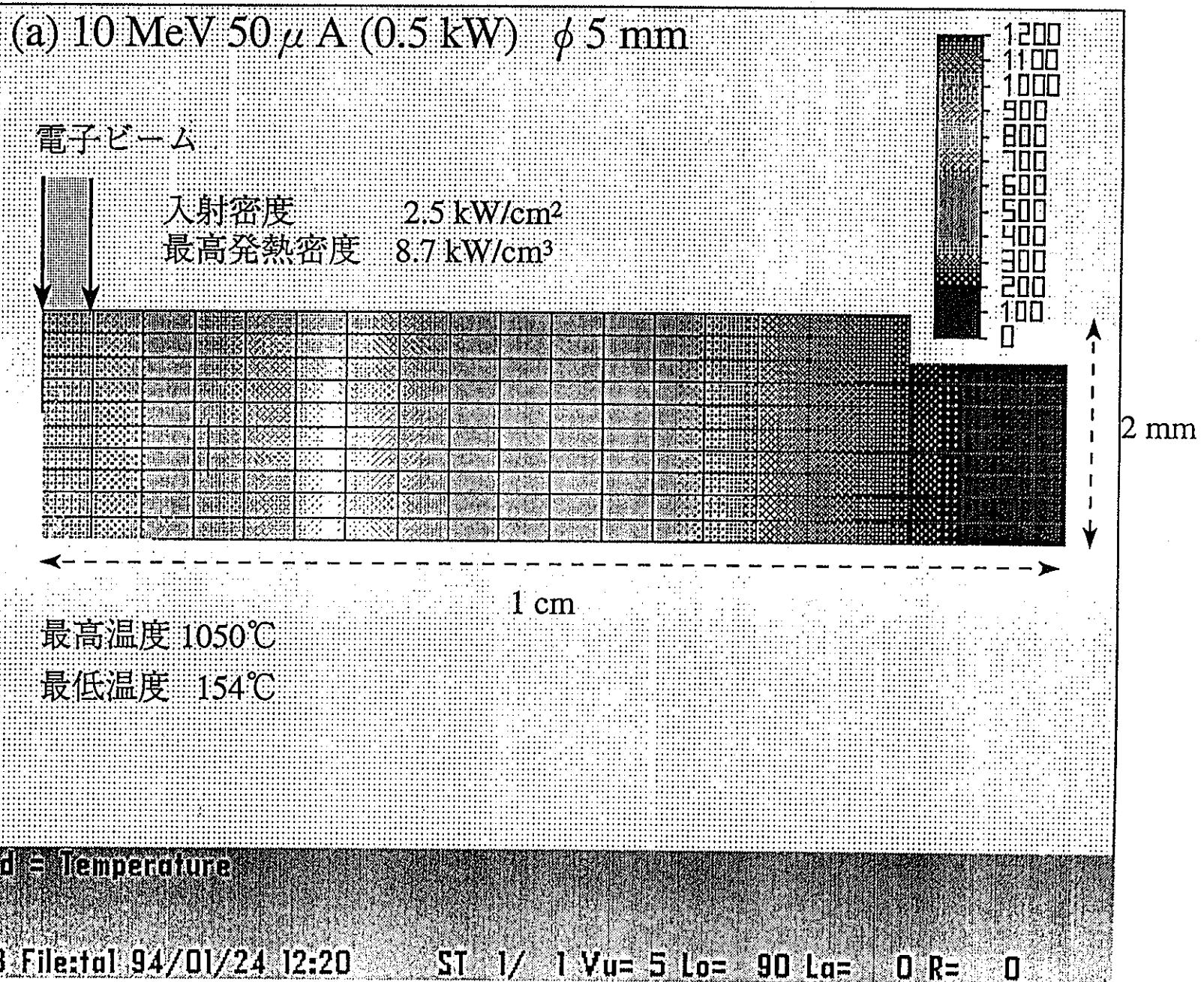
熱伝達率

$$h=20800 \text{ W/m}^2/\text{deg}$$

・形状



♦ ALGOR+V  
SHOW T-Hi  
Hidden I  
Light  
Temp-hi  
General  
Smoothed  
+ Mesh  
Contour  
Ignore X  
Bitmap  
Do dither  
Var out  
[Esc]  
1Help 2Undo  
3Inp 4Snap  
5Cur 6Swtc  
7Big 8Menu  
9Top 0Draw  
Dither method = Temperature  
[No frills]  
SYVIEW 4.08 File:tal 94/01/24 12:20 ST 1/ 1 Vu= 5 Lo= 90 La= 0 R= 0



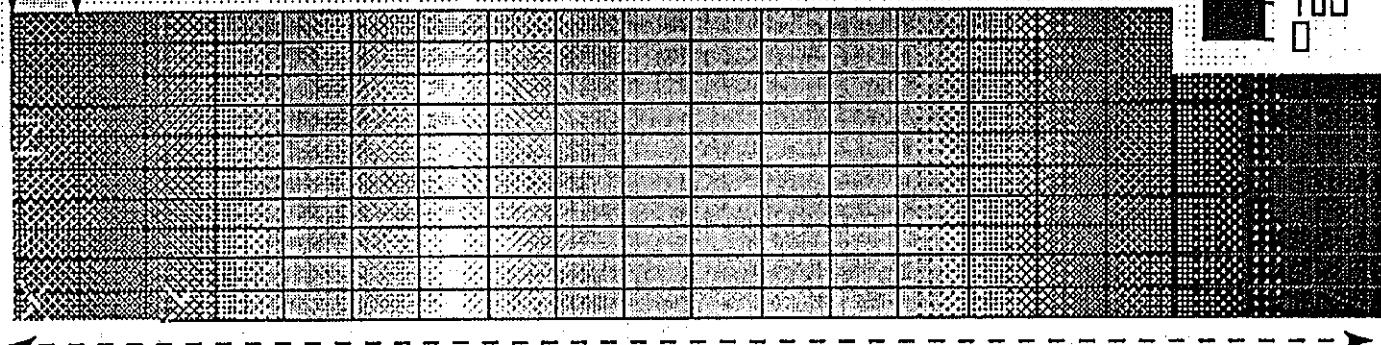
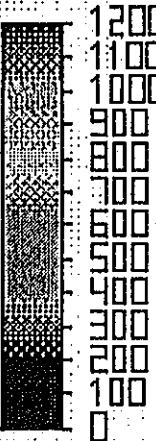
◆ ALGOR+V  
SHOW T-HT  
Hidden  
Light  
\*Temp-hi  
General  
Smoothed  
\*Mesh  
Contour  
[gnd box]  
Bitmap  
Do dither  
Var out  
[Esc]

(b) 100 MeV 50  $\mu$ A (5 kW)  $\phi$  5 mm

電子ビーム



入射密度 25 kW/cm<sup>2</sup>  
最高発熱密度 8.9 kW/cm<sup>3</sup>



1 cm

最高温度 1140°C

最低温度 167°C

1Help 2Undo  
3Inp 4Snap  
5Cur 6Swic  
7Big 8Menu  
9Top 0Draw  
Dither method = Temperature

[No frills]

SVIEWT 4.08 File:fa3 94/01/24 12:32 ST 1/ 1 Vu= 5 Lo= 90 La= 0 R= 0

## ALGOR 計算結果

エネルギー	ビーム径	最高温度 (°C)	
		200 kW入射	最適化
10 MeV	φ 5 mm	>10 <sup>5</sup>	1050 (0.5kW)
100 MeV	φ 5 mm	>10 <sup>5</sup>	1140 (5.0kW)



→ 入射電流密度(空間的、時間的)を抑えるターゲット構造・  
ターゲットから効率良く陽電子を集める収束系を検討する。

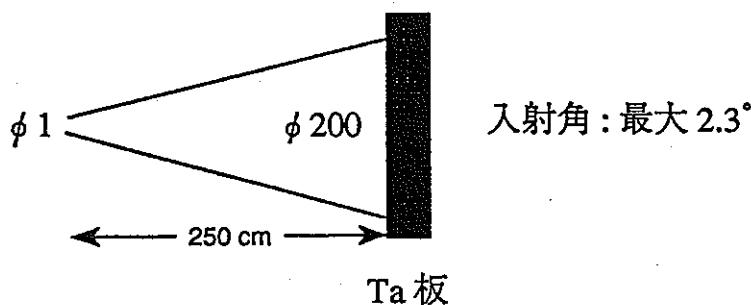
## 入射電流密度の低減化

空間的・時間的に入射電流密度を減らす

### 例 1 ビーム拡大方法

10 MeV 20 mA (200kW)

拡大電子ビーム

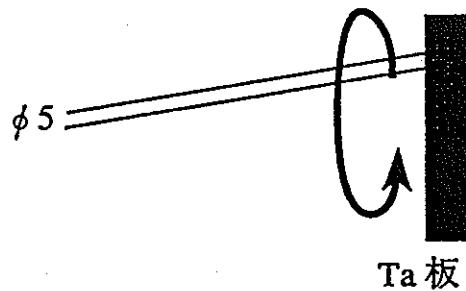


→  $\phi 5 \text{ mm}$  と比較して 4倍 (2 kW) まで入射可能

### 例 2 ビーム回転方法

10 MeV 20 mA (200kW)

平行電子ビーム



## 入射方法(輸送系)の考察

→ 新しい概念に基づく標的の開発

◆ ALGOR+V  
SHOW THT  
Hidden  
Light  
"Tempsh"  
-----  
General  
Smoothed  
"Mesh  
Contour  
Ignd box  
-----  
Bitmap  
Do dither  
Var out  
-----  
[Esc]

1Help 2Undo  
3Inp 4Snap  
5Cur 6Swfc  
7Big 8Menu  
9Top 0Draw

Dither method = Temperature

[No frills]

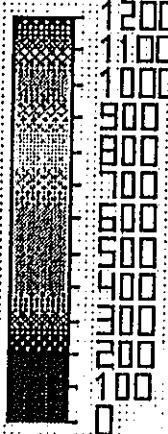
SYVIEW 4.08 File:tq2 94/01/24 12:40

ST 1/ 1 Vu= 5 Lo= 90 La= 0 R= 0

10 MeV 200  $\mu$  A ( 2 kW)  $\phi$  200 mm

電子ビーム

入射密度 6.4 W/cm<sup>2</sup>  
最高発熱密度 25 W/cm<sup>3</sup>



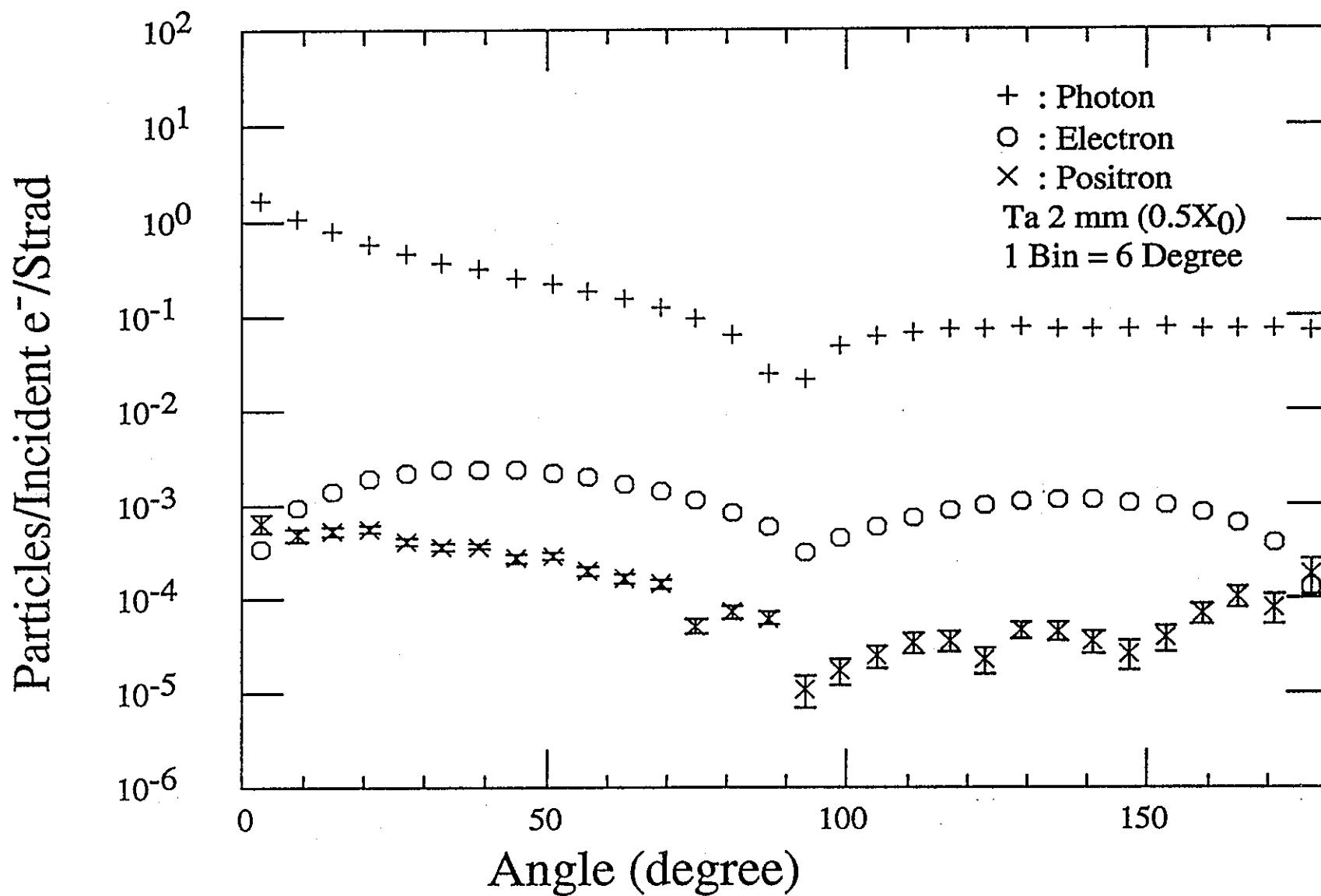
2 mm

10 cm

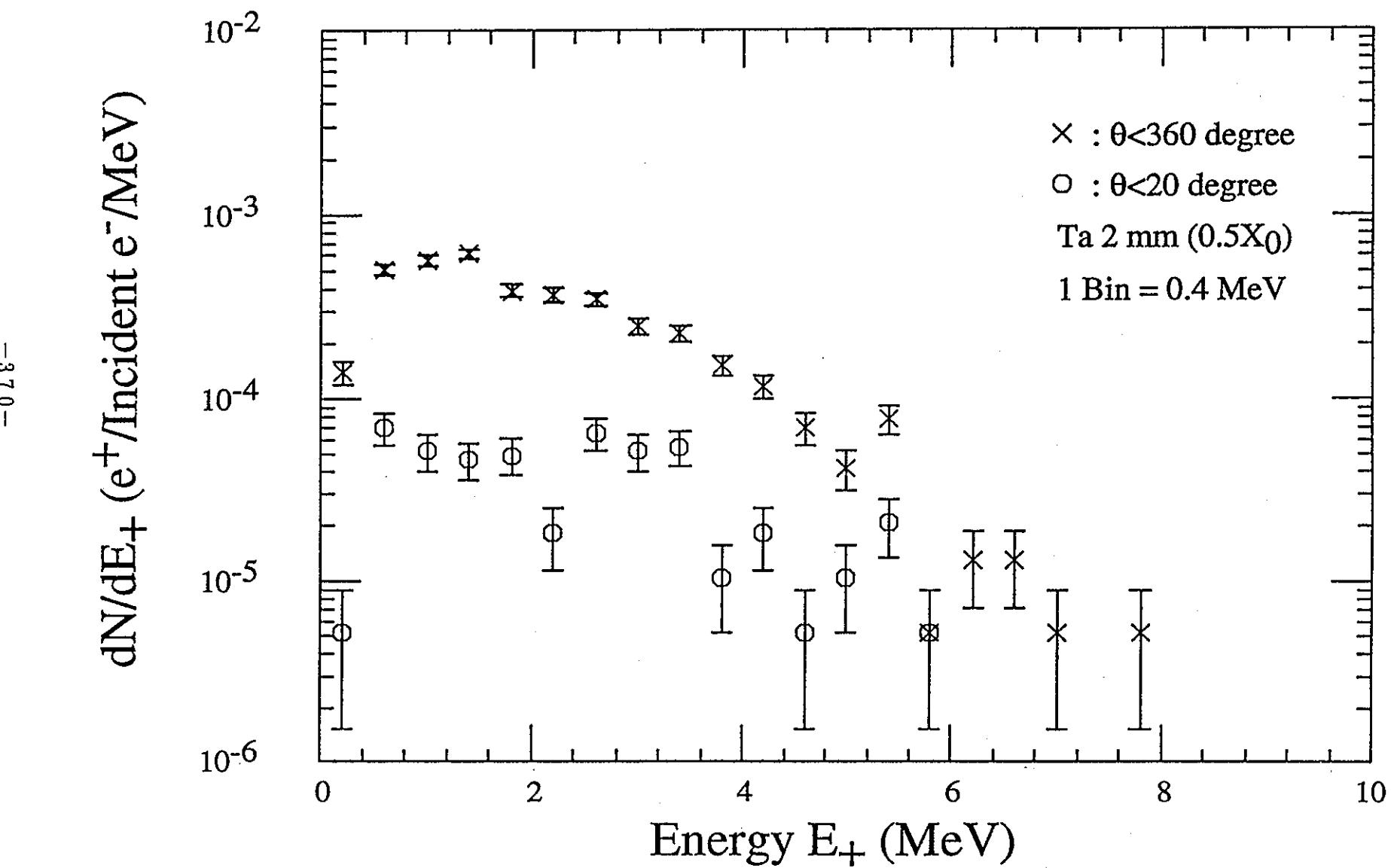
最高温度 1092°C

最低温度 55.7°C

# Angle Dist. (10 MeV $\phi$ 200)



# Positron Energy Dist. (10 MeV $\phi$ 200)



## PNCにおける陽電子数について

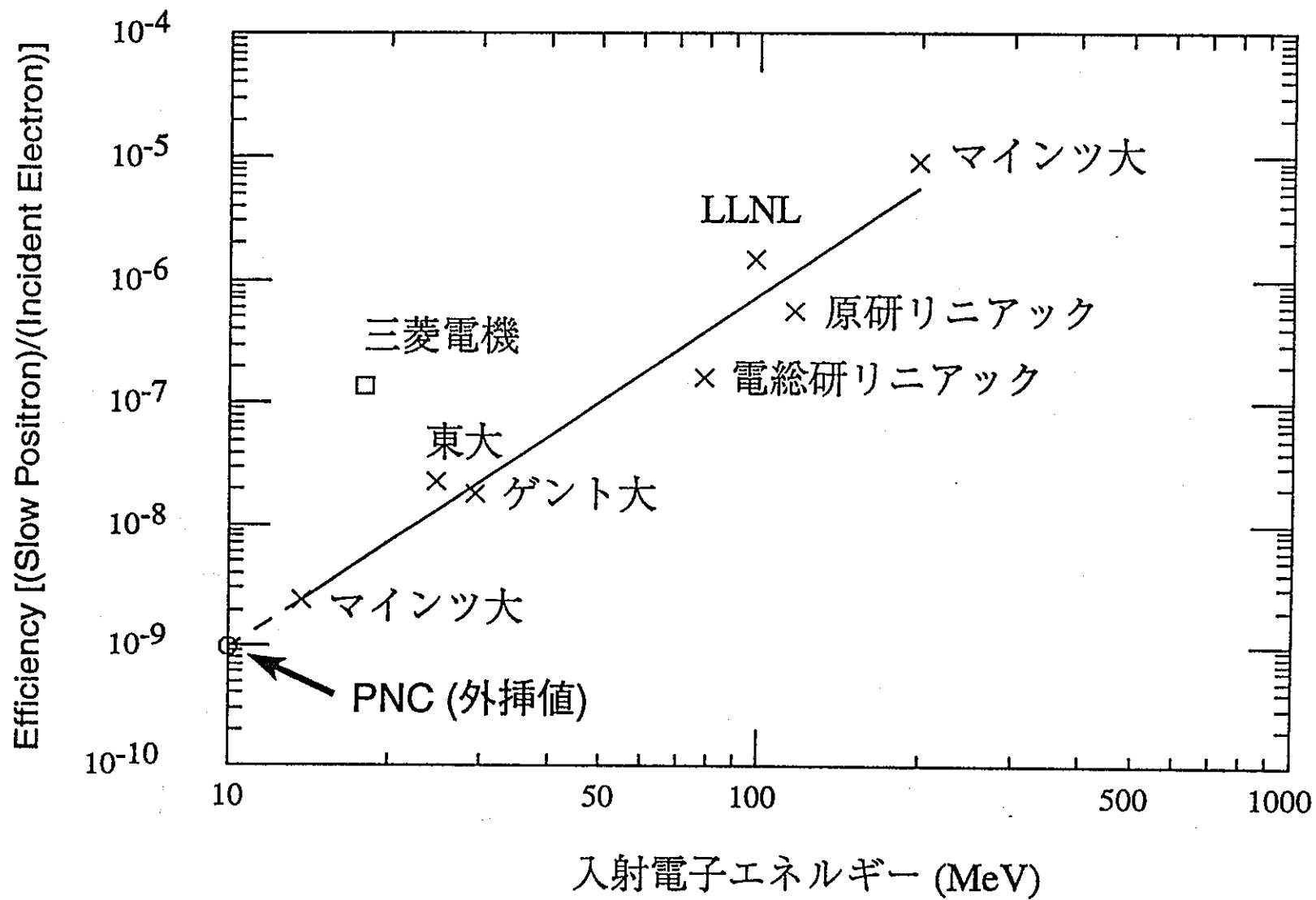
入射電子エネルギー 10 MeV

	φ 5mm	目標値
入射電子数(個／秒)	$3.1 \times 10^{14}$ (0.5kW)	$1.3 \times 10^{17}$ (200kW)
Ta板陽電子発生効率	$2 \times 10^{-4}$	$9.7 \times 10^{-10}$ (外挿値)
収束・輸送効率*	$2 \times 10^{-6}$	
生成陽電子数(個／秒)	$1.2 \times 10^5$	$1.3 \times 10^8$

\*) 目標値と仮定する。

陽電子生成効率(発生・収束・輸送各効率)として $10^{-9}$ 以上の装置を開発することを目標とし、陽電子数として $10^8 \sim 10^9$ (個／秒)を目指す。

## 低速陽電子発生効率



# マインツ大低速陽電子源

14 MeV Electron  
入射電子電力 210 W  
生成効率  $2.3 \times 10^{-9}$

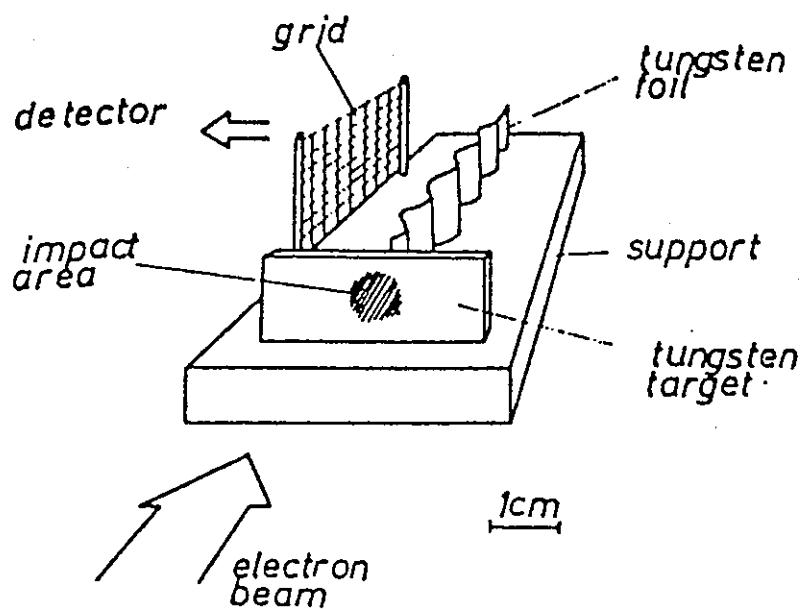


Fig. 3. Arrangement of target and positron converter (schematically).

# 三菱電機(株)低速陽電子源

18 MeV Electron  
入射電子電力 16.2 W  
生成効率  $1.35 \times 10^{-7}$

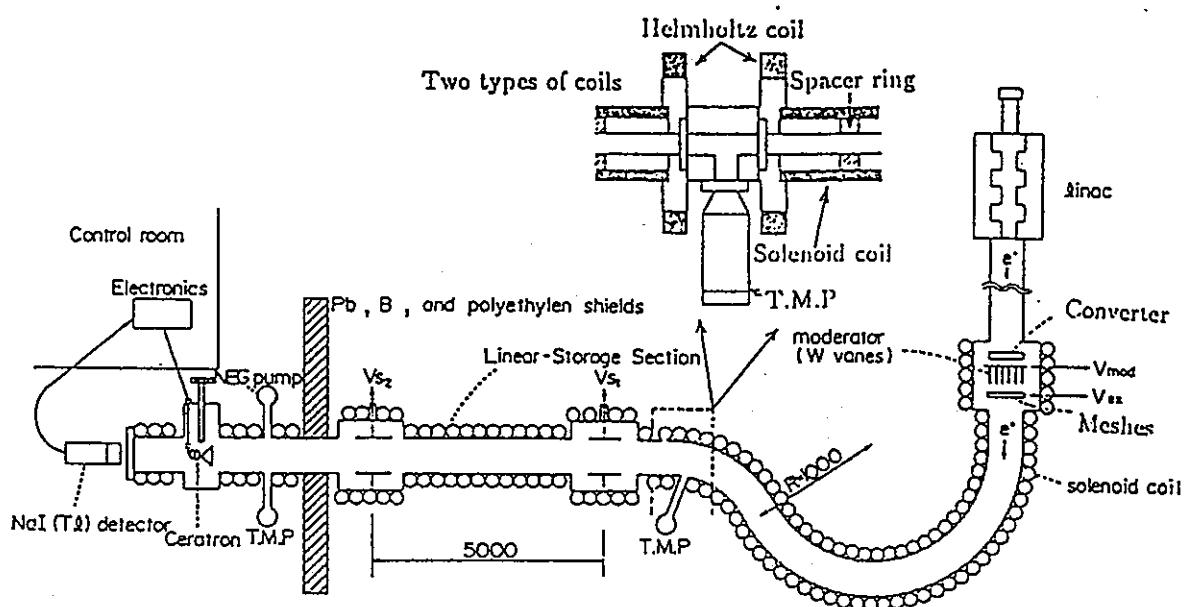


Fig. 1. Experimental setup for slow positron production.

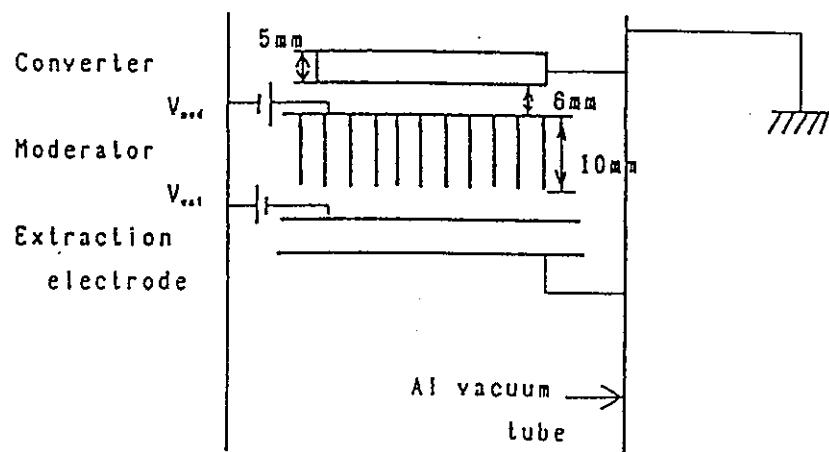
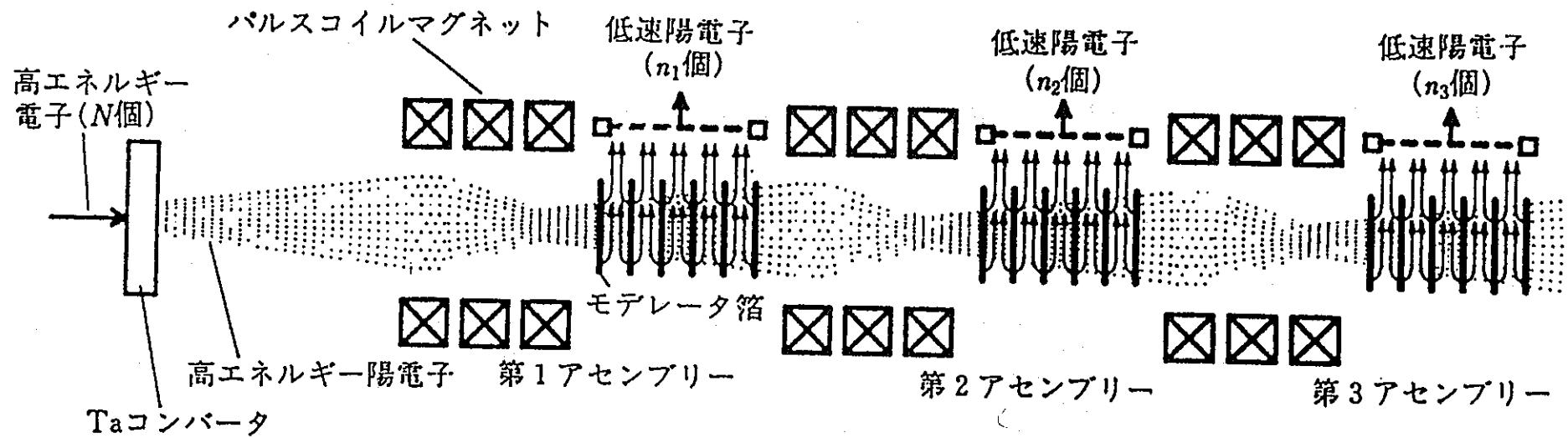


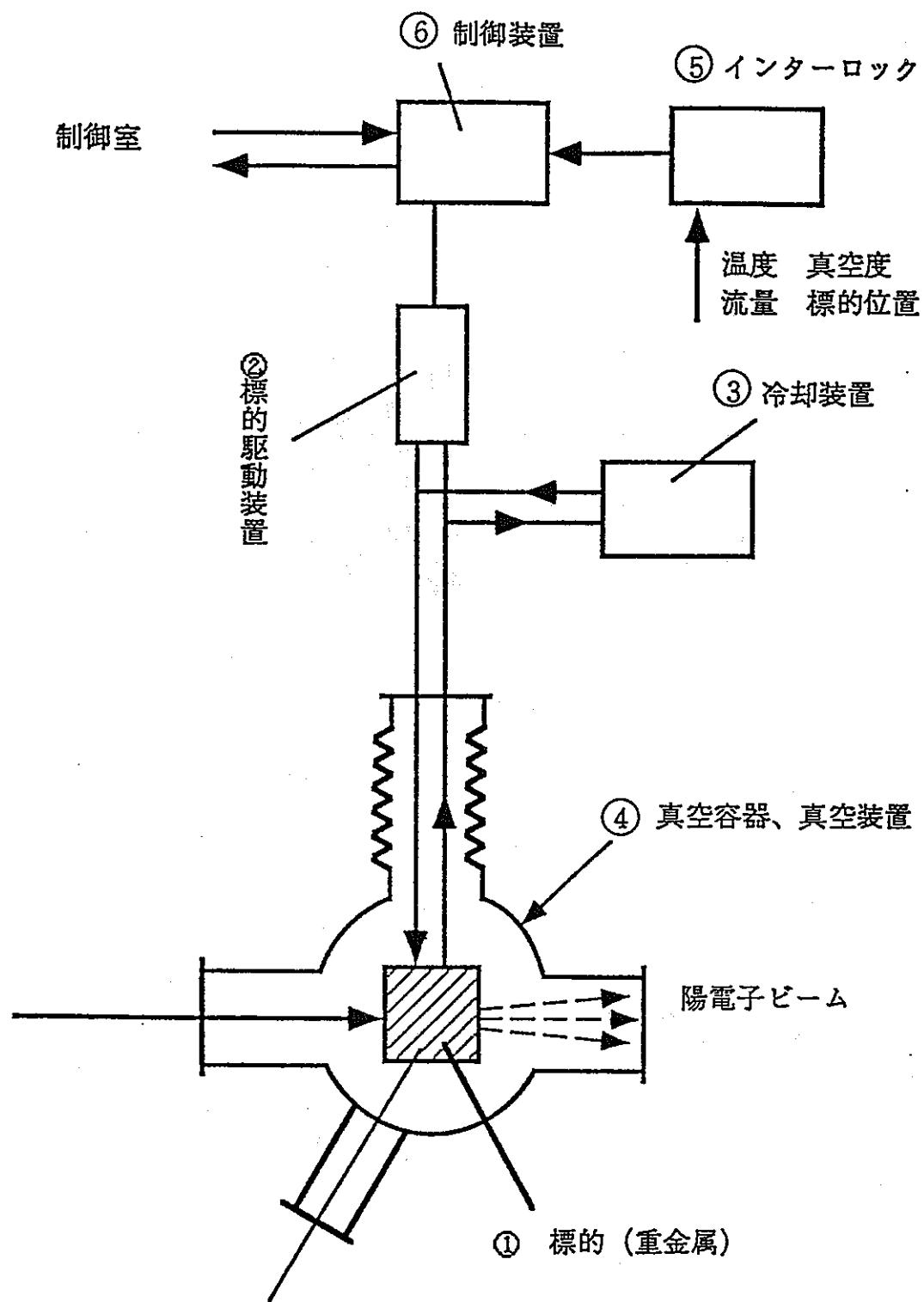
Fig. 2. Schematic drawing of the positron source consisting of the electric potential configuration.

## まとめ

1. 大電流電子加速器の特徴 (**10MeV・200 kW・CW**) を生かした大電流陽電子源の開発を行う。
2. 大電流陽電子源を開発するためには検討しなければならない課題(入射方法・熱除去・放射線汚染対策・収束系等)が多い。
3. 陽電子生成効率**10<sup>-9</sup>**、陽電子数 **10<sup>8</sup>～10<sup>9</sup> 個/秒** (keV～MeV) の陽電子ビームを目標に開発を行う。

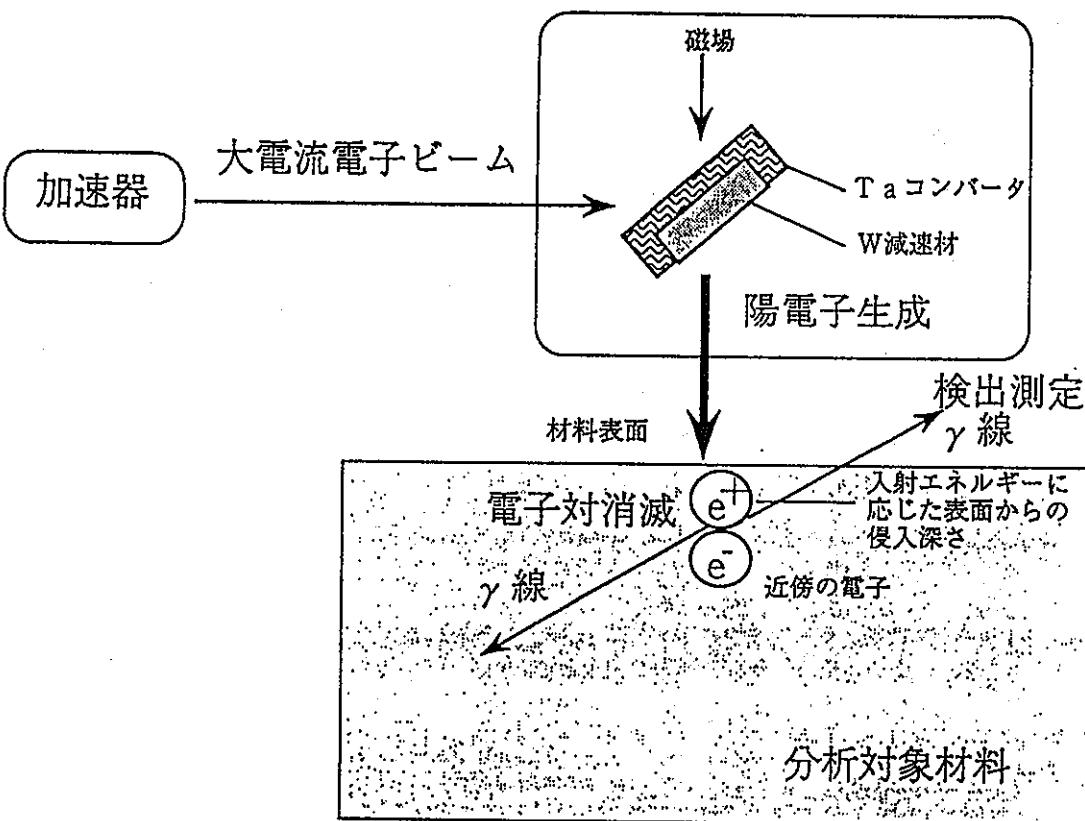


資料3 標的部収束系及び輸送系概念図



資料2 陽電子標的概念図

## 資料1 電子線形加速器による陽電子生成とその応用例



### 陽電子ビームの特徴

1. 消滅 $\gamma$ 線が種々の情報（電子の運動量、エネルギー、電子密度、消滅位置）を伝播
2. 消滅位置を陽電子入射エネルギーにより制御できるので、特定位置の電子構造を解析できる
3. 低速陽電子を用いることで表面近傍の分析が可能
4. 電子と電子対消滅することによりイオン化できる（再結合なし）

### 陽電子入射から消滅 $\gamma$ 線発生までのスキーム

1. 陽電子の材料表面への入射
2. 入射時のエネルギーに相当する深さまで到達
2. 減速（電子との非弾性散乱）  
0.025eV熱エネルギー（単色化）
3. 近傍の電子と電子対消滅
4.  $\gamma$ 線を放出（電子の運動量、エネルギー、電子密度、消滅位置の情報を伝播する）

### 陽電子ビーム高度利用としては 表面、表面近傍における

- 欠陥挙動解明
  - 原子、電子構造解明
  - 化学反応過程解明
  - 高分子構造解明
- があげられる

### 動燃の陽電子ビームの応用例としては

- 常陽での照射試験
  - 加速器による照射試験
- の一部として燃料材料等の照射損傷を精度高く調べること等に用いられる