

JAERI -M
83-173

KWU/CE燃料棒のPCI/SCC挙動
(オーバーランプ計画研究成果)

1983年10月

菊地 章

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

KWU/CE燃料棒のPCI/SCC挙動
(オーバーランプ計画研究成果)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
菊 地 章

(1983年9月30日受理)

オーバーランプ計画はPWR型燃料棒のPCI/SCC破損挙動を研究するための国際協力による出力急昇(ランプ)照射試験である。スウェーデン・スタズビック(Studsvik)を研究センターとして、原研をはじめ9ヶ国12機関が加盟し、1977年4月から1980年12月まで実施された。1983年1月、研究成果が公開可能となり、ここに得られた成果の一部(KWU/CE燃料棒)を報告する。

PCI/SCC Failure Behavior of KWU/CE Fuel Rods
(Investigation Results in Over Ramp Project)

Akira KIKUCHI

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 30, 1983)

The Over Ramp (Studsвик Over Ramp-STOR) project is an international power ramping irradiation program for studying PCI/SCC failure behavior of PWR-fuel rods. The project had its activities for about three years (Apr., 1977 - Dec., 1980) as the cooperation works of twelve participants composing nine countries.

The present report introduces the irradiation data on the KWU/CE fuel rods in the project and discusses the failure behavior of PWR-fuel rods.

Keywords : Over Ramp Project, PCI/SCC, KWU/SCC, KWU/CE Rod, PWR, Failure Behavior, Fuel Rods, Power Ramping Irradiation

目 次

1. 序 言	1
2. 目的および活動	2
2.1 目 的	2
2.2 活 動	2
3. 照射試験および結果	2
3.1 照射試料の特性	3
3.1.1 燃料棒の特性	3
3.1.2 燃料ペレットの特性	3
3.1.3 被覆管の特性	4
3.1.4 特性のまとめ	4
3.2 照射データ	5
3.2.1 照射条件	5
3.2.2 破損挙動	5
3.2.3 まとめ	5
3.3 ベース照射後データ	6
3.3.1 クリープダウン	6
3.3.2 棒長変化	6
3.3.3 ペレットスタック長変化	6
3.3.4 オバリティー	6
3.3.5 リッジ	7
3.3.6 まとめ	7
3.4 ランプ照射後データ	7
3.4.1 リッジ	7
3.4.2 ディッシュ巾	7
3.4.3 FPガス放出	7
3.4.4 粒界ポアー	8
3.4.5 粒成長	8
3.4.6 まとめ	8
3.5 FEMAXI-Ⅲによる解析	8
3.5.1 被覆管応力と実効出力増分	8
3.5.2 FPガス放出とペレット中心温度	9
4. 考 察	9
4.1 データ編集	9
4.2 破損挙動	10

4.3	変形挙動	11
4.4	F P 放出挙動	11
4.5	今後の課題	11
5.	結 言	12
	謝 辞	13
	参考文献	13

Contents

1.	Introduction	1
2.	Objectives and Activities	2
2.1	Objectives	2
2.2	Activities	2
3.	Irradiation Tests and Results	2
3.1	Characteristics of Irradiation Samples	3
3.1.1	Fuel Rods	3
3.1.2	Fuel Pellet	3
3.1.3	Cladding	4
3.1.4	Summary	4
3.2	Irradiation Data	5
3.2.1	Irradiation Conditions	5
3.2.2	Failure Behavior	5
3.2.3	Summary	5
3.3	Data after Base Irradiation	6
3.3.1	Creep Down	6
3.3.2	Change of rod length	6
3.3.3	Change of Pellet Stack Length	6
3.3.4	Ovality	6
3.3.5	Ridge	7
3.3.6	Summary	7
3.4	Data after Ramp Irradiation	7
3.4.1	Redge	7
3.4.2	Dish Width	7
3.4.3	FP Gas Release	7
3.4.4	Pore at Grain Boundary	8
3.4.5	Grain Growth	8
3.4.6	Summary	8
3.5	Analyses due to the Code FEMAXI-III	8
3.5.1	Stress in the Cladding vs. Effective Power Increase	8
3.5.2	FP Gas Release vs. Center Temperature in Pellet	9

4.	Discussion	9
4.1	Editing of Data	9
4.2	Failure Behavior	10
4.3	Deformation Behavior	11
4.4	FP Release Behavior	11
4.5	Future Subjects	11
5.	Conclusion	12
	Acknowledgement	13
	References	13

1. 序 言

スウェーデン・スタズビック (Studsvik Energiteknik AB) を研究センターとして、現在まで、国際協力による5つのプロジェクトが実施されてきた。これらのプロジェクトの目的は軽水炉燃料の出力急昇時 (ランプ) におけるPCI/SCC (ペレット・被覆相互作用/応力腐食割れ) 破損挙動を明らかにすることである。5つのプロジェクトおよびそれらの研究目標は次のとおりである。

- 〔1〕 インターランプ計画 …… BWR型燃料の挙動
- 〔2〕 オーバーランプ計画 …… PWR型燃料の挙動
- 〔3〕 デモランプ1計画 …… BWR型改良燃料の挙動
- 〔4〕 デモランプ2計画 …… PCI/SCC破損メカニズムの解明
- 〔5〕 スーパーランプ計画 …… 高燃焼燃料における挙動

これらのプロジェクトは、現在、殆んど終了しており、既にインターランプ計画⁽¹⁾およびオーバーランプ計画の研究成果が公開可能となっている。

オーバーランプ計画 (STOR計画と以下略称する) は1977年4月以降約3カ年半にわたって実施された。これには原研をはじめ9ヶ国の計12機関が加盟した。ランプ試験された燃料棒試料数は計40本であり、これらは計9種の燃料グループに分類される。さらに燃料棒試料は製造・提供の面からKWU/CE棒 (6燃料グループ) およびW棒 (ウエスティングハウス社製・3燃料グループ) の2種類に分別される。本報に記述するものはKWU/CE社製の6燃料グループについてである。

STOR計画で試験された6燃料グループ、24燃料棒試料の試験データを紹介することが本報の主目標であり、このため視覚的観点より極力図による表示を試みた。実験データの紹介に加えて、燃料挙動解析コードFEMAXI-III⁽²⁾による解析の1例も記述している。さらにスタズビック・データ編集コードSTRIP⁽³⁾によるデータ編集の1例も紹介する。

2. 目的および活動

2.1 目的

S TORプロジェクトの目的はPWR型燃料棒に出力急昇（ランプ）が生じた場合のP C I / S C C挙動を広く把握することである。具体的には頭初次の4点にその目的を集約した。

- 1) 破損挙動と設計・材料パラメーターとの関連
- 2) 破損挙動と照射条件の関連
- 3) 破損の系統性, モードおよび機構の探求
- 4) 破損解析, 燃料モデリングへのデータ提供

これらの目的を達成するため, 6燃料グループのK W U / C E社製燃料棒が選択された。これらの燃料棒はスタズビックR 2炉でのランプ照射に先立って, 既に西独オブリッヒハイム炉（K W O - P W R）でベース照射されたものである。なおB W R型燃料の試験は同様の目的をもってインターランプ計画で実施されたことを補足する。

2.2 活動

S TORプロジェクトでは次のような分担で作業が進められた。

- 1) 燃料棒製造・特性試験 ……K W U社（西独）
- 2) ベース照射 ……オブリッヒハイム炉（西独）
- 3) ベース照射後特性試験 ……カールシュタイン（K W U）
- 4) ランプ照射 ……R 2炉（スタズビック）
- 5) ランプ照射後特性試験 ……R 2炉プールサイド装置
- 6) 照射後試験 ……スタズビック・ホットラボ

プロジェクトは加盟機関の代表者より構成されるプロジェクト委員会（P C M）によって運営された。運営委員会は年間2回の割合で開催され, 計8回の会合が持たれた。こゝでは研究の進捗状況が報告されたほか, データが検討され, 計画が討議された。

またプロジェクトではその開催期間中, 研究成果を総合報告書（S T O P報告37報⁽⁴⁾）および内部報告書（O R報告約50報）で総括している。

3. 照射試験および結果

本章ではK W U / C E燃料6グループ, 計24本について得られた試験データをありのままに示す。試料の特性, 照射データ, ベース照射後データおよびランプ照射後データに分けてデータを

図的表示する。なおデータベースとしてまとめたものをTable 2.1～Table 2.3 (Table 1も参照)に挙げる。またFEMAXI-Ⅲで解析して得た計算データも本章で記述する。なおこれら全てのデータに関連する破損挙動については次章で考察する。

3.1 照射試料の特性

燃料グループ6種 (A10, A20, E10, G20, F20およびF30)のグループ平均試料特性をFig.1およびFig.1 (Conti.)に示す。数値(10, 20および30)はベース照射で受けた燃焼度より名付けたもので、従って種別的にはA, E, GおよびFの4つになる。以下これらの図より判る燃料棒試料の代表的特性を列挙して示す。

3.1.1 燃料棒の特性 Fig.1 (R1, R2, R3)

1) P/Cギャップ (R1)

P/C (ペレット/被覆管)ギャップは燃料棒の特性として最も重要なものである。製造誤差(約15ミクロン)を考慮するとA, EおよびGグループのギャップはほぼ同程度であるが、Fグループは約30ミクロン程大きな値をもっている。この値は他のグループのギャップに比較して約20%程大きく、従って被覆管内応力などへの影響が予想される。

2) オバリティー (R2)

EおよびFグループはAおよびGグループより比較的大きなオバリティー(燃料棒における局所的たわみ)をもっている。(参照図……Fig.3(N4))。オバリティーはそれ程大きいものでなく、他の特性と較べてあまり重要とは思われない。

3) ペレットスタック長 (R3)

GグループのUO₂ペレットスタック長は他に較べて5mm短かい。ペレット全長は約400mm程度であり、その割合は約1%と小さく、これも特性上、あまり重要とは考えられない。(参照図Fig.3(N3))

3.1.2 燃料ペレットの特性 Fig.1 (P1～P3)およびFig.1 (Conti)(P4～P6)

1) ペレット結晶粒径 (P1)

ペレットの粒径はFPガス放出に關与する重要な特性である。Gグループの粒径は他のものに比較して約4倍程大きい。

2) 熱的安定性 (P2)

製造したペレットの熱的安定性を調べるため、1700℃、2.5時間の加熱実験を行っている。これによるとGグループの安定性はすこぶる良いが、FグループではAおよびEグループに較べて約2倍程密度が減少しており、Fグループの熱的安定性の悪いことが判った。

3) 密度 (P3)

AおよびEグループの密度はGおよびFグループのそれよりやゝ小さい。

4) 気孔率 (P4)

Fグループにおけるペレット内気孔のほとんど(約90%)が閉気孔である。Gグループの閉気孔率は約60%であり、またAおよびEグループのそれは約35%と小さい。

5) ペレット形状 (P6)

AおよびEグループでのペレット形状はCD型(仮称…Fig.1 P6参照)であり、一方、GおよびFグループのそれはCFDm型(仮称…Fig.1 P6参照)である。ペレット形状は比較的重要な特性と考えられ、AおよびEとGおよびFグループ間の形状の差異に注目したい。

3.1.3 被覆管の特性

1) 配向性 (C1)

Gグループの被覆管は他のものに比較して約3分の1程の小さな F_n 値を有する。このようにGグループの配向性は良いが、全体的に全てのグループの F_n 値は小さく、結晶組織の配向性はよいものと思われる。

2) 機械的性質 (C2)

Fグループの被覆管における400℃での最大引張応力(UTS)および0.2%降伏応力(0.2%YS)は他に比較して極端に小さい。

3) 伸び (C3)

400℃での伸びについては、FおよびGグループはAおよびEグループのその約2倍である。クリープひずみは全燃料グループをとおして同程度の値をもつ。

3.1.4 特性のまとめ

1) 燃料グループAおよびEの特性

グループA(A10およびA20)およびE(E10)をKWU/CE棒の標準として、他のグループの特性をまとめる。なおAに対するEグループの差異はオバリティー、 F_n 値、機械的性質などにみられるが、あまり重要なものとは思われない。

2) 燃料グループGの特性

グループG(G20)の特性は、ペレットスタック長がやゝ短いこと、粒径が極めて大きいこと、熱的安定性にすぐれていること、特殊なペレット形状であること、などである。特に粒径と熱的安定性の2点に着目したい。

3) 燃料グループFの特性

グループF(F20およびF30)には多くの特殊性が含まれている。P/Cギャップの大きいこと、熱的にすこぶる不安定なこと、約90%の閉気孔を有すること、非常に軟らかい被覆材で、伸びも大きいこと、などいずれも重要な特性と考えられる。なお照射試料の特性からグループF20およびF30の相異をみると、P/Cギャップ、オバリティーの2点を挙げる事ができる。しかしながら、P/Cギャップの差異も測定誤差の範囲にあり、これら2グループ間(F20およびF30)での特性上の差異はないものと思われる。

以上、燃料グループAおよびEを標準として他のグループの特性を仮想評価すると、グループGはPCI/SCC挙動に対して比較的よい試料特性をもつが、一方、グループFは特性上あまりよくないことが予想される。

3.2 照射データ

KWU/CE棒は西独PWRオリビヒハイム炉(KWO)でベース照射され、ひき続いてスウェーデンに輸送した後、スタズビックR2炉のHe³-LOOPでランプ照射された。ベース照射およびランプ照射における出力および破損、非破損状況をFig.2に示す。

3.2.1 照射条件

ベース照射では各燃料グループ毎(燃料棒各5本)に炉の高さ方向に燃料棒を接合して照射された。この関係で実験に利用された4本の燃料棒間にベース照射平均出力の差異が存在した。KWO炉の場合、1原子炉サイクルで約10GWD/tUの燃焼度となり、各グループはほぼ照射サイクル数に比例した燃焼度をもつ。(燃焼度はTable 2-1~Table 2-3のBURNUP項参照)。多サイクル照射のグループでは2サイクル目の出力が大きいが、F30では3サイクル目の出力が大きく低下している。またグループF30のベース照射出力は他に較べて全体的に小さい。

ランプ照射は各燃料グループ毎に破損、非破損状況を検討しながら1本づつ実施された。ランプ出力までの出力急昇速度(PRR)は通常100W/cm-minに設定されたが、燃料棒A10/3、E10/3およびE10/4は非常にゆっくりと出力が増大された。(なおランプ照射条件の詳細はTable 2-1~Table 2-3参照)。

3.2.2 破損挙動

燃料グループA10では500W/cm以上のランプ出力にもかかわらず全て非破損であった。しかしながら同種仕様かつ燃焼度の大きいA20では515W/cmで破損が生じた(A20/2)。グループEでは475W/cmで破損を生じた(E10/2)が、それより大きな出力かつ遅いランプ速度の燃料棒(E10/3およびE10/4)は非破損であった。

一方、燃料仕様上よい特性であると判断されたグループG20(前3.1節参照)では480W/cmで破損(G20/3)が生じていた。また、あまりよくない特性と判断したグループFについては、予想どおりF20における破損しきい値が低い結果を示している。しかしながら、より燃焼度の大きいグループF30の破損しきい値はF20より高い値を示している。

3.2.3 まとめ

Fig.2に示される各燃料グループ間あるいはグループ内での破損、非破損状況を解釈づけることが当照射研究の本命である。この図より直観的に解釈可能なものもあるが、また解釈しきれぬことも多々存在する。総括的な検討は、さらに、次節以降に記述する諸データも加え、かつ解析作業の結果も加えてなされるもので、次章の考察でとり扱う。従って本節のまとめとして問題提起にとどめたい。

〔問題提起〕

- 1) グループE10とA10の相関
- 2) グループA20とG20の相関
- 3) グループF20とF30の相関
- 4) ベース照射条件の破損への寄与

3.3 ベース照射後データ

ベース照射を終了した燃料棒試料はスタズビックR2炉のプールサイドに設置した装置によって非破壊試験(NDE)され、ランプ照射前の特性としてまとめられた。NDEとしてプロフィロメトリー、渦電流探傷、中性子ラジオグラフィー、アスキャンニングなどが実施されたが、本節ではこれらのNDEから得られた主要データを紹介する。なお主要なデータをFig.3に示す。(Table 2-1~Table 2-3参照)

3.3.1 クリープダウン (N1)

クリープダウン(燃料棒外径の減少)はプロフィロメトリーから求められた。燃料グループA20、G20およびF30では比較的大きな被覆管外径減少が生じている。E10およびF20におけるクリープダウンは相対的に小さく、A10が最も小さい。なお試料特性にはあまり現われなかったが、グループA10とE10のクリープダウンの相関に注目しておきたい。共通した現象は、低ベース照射出力のもの程クリープダウンの少ないことである。

3.3.2 棒長変化 (RLI-N2)

被覆管の長さ方向永久変化を意味するが、燃料グループG20でやゝ大きく、グループA10およびE10では少ない。G20における大きな値は試料特性(ペレットの安定性、被覆管の配向性など)にも起因しているものと推察される。

3.3.3 ペレットスタック長変化 (PSLD-N3)

ベース照射によってペレットのスタック長はグループG20を除いていずれの場合も減少している。スタック長減少はペレットの焼きしまり効果によるもので、従って試料仕様(気孔、安定性など)に依存する。グループAおよびEの開気孔が少ないこと、F30の場合長時間ベース照射によるスウェリングの寄与、G20の熱的安定性などを総括すると、各燃料グループ間の相関を容易に解釈することができよう。

3.3.4 オバリティー (N4)

オバリティーは試料特性(Fig.1(R2)参照)と相対した様相を示している。グループEおよびFで大きく、Gが少ない。

3.3.5 リッジ (RH-N5)

ベース照射において燃料グループG20にのみ比較的大きなリッジが形成された。グループG20の特殊性が明らかに現われた1例である。

3.3.6 まとめ

燃料グループG20にはクリープダウン、棒長変化、ペレットスタック長変化およびリッジの全てにわたり、他のグループと相異した様相をみることができる。この点は試料の仕様特性からかなり解釈可能であり、さらにベース照射後データ全般にわたって、解釈のむづかしい点は比較的少ないものと思われる。

3.4 ランプ照射後データ

ランプ照射の後、スタズビック・ホットラボにおいて照射後試験(PIE)が行われた。主要な項目はプロフィロメトリー、パンクチュアーによるFPガス放出率、金相、SEMなどである。これらのPIEから求められた代表的データをFig.4およびFig.4(Conti.)に示す。

3.4.1 リッジ (E1)

ベース照射終了後の燃料棒ではグループG20にのみリッジの形成をみたが(Fig.3(N5)参照)、ランプ照射によって全燃料棒にリッジを生じた。グループF20、F30、A20でのリッジの高さはランプ照射出力に応じて変化しているが、A10およびE10ではほぼ1定で、かつ小さい。図より全体的に判ることはリッジ高さの燃焼度依存性の存在することである。ベース照射の終了時点でリッジは形成されていないが、多分、燃焼度に依存した形成可能状態が存在し、ひき続くランプ照射でそれが出現したものと思われる。

3.4.2 ディッシュ巾 (E2)

燃料グループGおよびFにおけるペレット形状は他のグループのそれと異り(Fig.1(Conti.)(P6)参照)、フラットなディッシュ底をなしている。ランプ照射終了後の金相から得たこのディッシュ巾(初期約0.6mm)の残留値が図に示されている。グループF20では4本の燃料棒ともディッシュがかなり消滅しているが、一方、その他のグループでは大きなランプ出力の領域で消滅している。なおF20とF30における残留ディッシュ巾の傾向の相異に注目したい。

3.4.3 FPガス放出 (E3)

非破損燃料棒ではペレット外に放出されたFPガスの割合(FPガス放出率)が求められた。図にみられるようにランプ出力に対する関係は3つに分類される。第1はグループA20およびF20のもので、第2はA10、E10およびF30、そして第3はグループG20である。特にG20では非常に少ないFPガス放出を示した。

3.4.4 粒界ポアー (E4)

STORプロジェクトで得られた興味あるデータのひとつは、粒界に集合したポアーの集積境界半径である。図に示すように前節のFPガス放出挙動と同様、ランプ出力に対する関係を3つに分類することができる。これらのうち2本の曲線の外挿点(ランプ出力線上)はFPガス放出についての開始出力点に対応していることが予想できる。図E3とE4の関連は着目に値する。

3.4.5 粒成長 (E5)

ペレットのセラモグラフより統計的に処理して求めたペレット中央部における粒径が図に示されている。グループGではランプ照射によっていくらかも粒成長を生じていないが、A20/3、A20/1では3~5倍程度の粒成長がみられる。粒成長は燃料棒の熱的状态を示すと同時に、また、FPガス放出、変形などを考える場合の基本的情報として重要なデータである。

3.4.6 まとめ

燃料グループFはランプ照射後データにおいても他のものに比較して特殊性をもっている。このグループではリッジが形成され易く、ペレットに大きな変形を与えている。FPガス放出、集積ポアー半径および粒径変化などを総体的にみると、燃料グループに対して3種に分割することができそうである。

3.5 FEMAXI-IIIによる解析

燃料挙動解析コードFEMAXI-IIIを用いてSTORプロジェクト用燃料棒の照射試験を予備的に解析した。それらのうち、被覆管に生じる応力、ペレットにおける中心温度、FPガス放出率、ペレット・被覆管の接触開始出力などについての解析例を以下に記述する。

3.5.1 被覆管応力と実効出力増分

FEMAXI-IIIを用いて、照射中に生じるペレット・被覆管接触開始出力およびランプ出力到達時における被覆管内最大応力を計算した。Fig.5は円周応力と実効出力増分(ランプ出力から接触開始出力を減じたもの)とを各燃料棒に対してプロットしたものである。

ランプ照射において出力が零からランプ出力まで増大する1時点でペレットは被覆管に接触し、以降、出力の増大にともなって接触状態が被覆管での応力に転換されるものと考えられる。故に実効出力増分はランプ出力時における被覆管内応力に対応することになる。

Fig.5にみられるように、燃料グループF20に対してひとつの関連を、また他のグループに対してもうひとつの関連を知ることができる。但し、A10/3、A10/4、E10/3、E10/4およびA20/1についての5点はこれらの関連からはづれている。さらに2つの関連の外挿点は原点に向っている。グループF20では3.2.2節(Fig.2参照)に記述したように、非常に低い破損しきい値を示したが、F20の特殊性が応力-実効出力増分関係にも現われたことに注目しておきたい。

3.5.2 FPガス放出とペレット中心温度

FEMAXI-IIIで各燃料棒のランプ出力到達時ペレット中心温度を求めた。さらにこの温度に基づいてFPガス放出率(FEMAXI-3ではビタンザのモデルを使用している)を計算した。FPガス放出率(計算および実測値)と中心温度との関連をFig.6に示す。

実測FPガス放出率の対中心温度プロットも3.4.3節(Fig.4(E3)参照)に記述したものと同様、2つの関連(実線および点線)を示すが、一方、計算値では異なる関連(1点鎖線)を示している。さらに計算値においては、殆んど全てのプロットが同一線上に存在している。実測値における異なる3つの関連が計算値では同一のひとつの関連に収まることはFEMAXI-IIIで用いたモデルが直接解析に応用できないことを暗示している。

燃料グループに対して何等かの異なるFPガス放出モデルが寄与していることは実験事実であり、今後、これを検討する必要がある。

4. 考 察

4.1 データ編集

第3章の実験結果にみられたように、燃料のPCI/SCC破損挙動に対して燃料試料の照射前特性、照射(ベースおよびランプ照射)条件および照射後特性(非破壊および破壊試験諸データ)が相互複雑に関連している。これらの関連性をまとめる意味で、著者は別に、“スタズビック・データ編集コードSTRIP”を作成し、諸データの検索、編集および総括を行った。本節ではこのコードを用いて実施したデータ編集例を参考までに紹介する。その結果をTable 3-1~Table 3-3に示す。

1) データ編集のためのシナリオ例

選択した燃料棒間の諸データを比較、検討する目的で次のような編集シナリオを作成した。

- a) 破損したか? その時の出力と時間は?
- b) どんな照射履歴(但し平均)を経たか?
- c) ところで照射前の主要な燃料棒仕様特性はどうであったか?
- d) どんなベース照射によってどんな非破壊試験データが得られたか?
- e) ひき続くランプ照射の照射条件に対してどんなデータが得られたか?

2) 編集で得られた知見

Table 3-1~Table 3-3のED1, ED2, ED3, ED4, ED5, ED6およびED7に比較興味のある燃料棒群についての編集結果を示す。各燃料棒群の選択理由は次のとおりである。

- ED1 ……同等燃焼度の最小出力破損棒
- ED2 ……同等燃焼度の最大出力非破損棒
- ED3 ……グループAの高出力対応燃料棒

ED4 ……グループAの低出力対応燃料棒

ED5 ……グループA10およびE10の同等出力燃料棒

ED6 ……グループF20およびF30の同等出力燃料棒

ED7 ……同等出力のグループA20, G20およびF20代表燃料棒

ED1にみられるように同等燃焼度の3本の燃料棒でも破損出力に大きな差がある。燃料特性上の相異(P/Cギャップ-GAP, 熱的安定性-DEN. INC, 気孔状態-POP, 粒径-GS, 被覆管特性-CHARAC, FNなど)が基本的に関係し, 照射後特性上の差異(棒長変化-RLD1, ランプ照射でのリッジ形成-RHDR, ディッシュ巾-DISH, Fなど)が生じ, これらが被覆管内発生応力の差に結びつくことにより, PCI/SCC破損状態の相異(破損ランプ出力-RTL, 破損時間-TFPD)となって現われたものであろう。以下ED2~ED7の各群に対してもこの編集結果がそれぞれの内容を示していることが判る。

しかしながら現時点のコードSTRIPには計算, 解析(たとえばFEMAXI-3による)データが含まれておらず, データ編集を完全なものとするためにはそれらの解析値(たとえば, 被覆管内発生応力, ペレット温度, 解析による変形等計算データその他)をデータベースに加える必要がある。それらを含めることにより, より詳しく, かつ意義ある編集が可能であると考えている。

4.2 破損挙動

1) 燃料グループ間における破損挙動

グループA10およびA20では燃焼度の増大ともなって破損しやすくなっている。しかしながらグループF(F10およびF20)では, 逆に燃焼度とともに破損抵抗を増した。F20とF30の間に燃料特性上の差異は殆んどないが, ベース照射条件(ベース照射出力)より差異が生じ始めている。グループF30のベース照射出力はF20のそれに比較してかなり小さい。このことがPCI/SCC破損の1因である被覆管内発生応力にかなり影響を与えているものと推察される。コードFEMAXI-IIIによる解析の円周応力状態(Fig. 5 参照)にみられるように, グループF20のみ他のものと異なる様相を示した。F20ではF30に比較して同一応力値に対して高い実効出力増分を必要としている。この差がベース照射条件の差に対応するものと思われる。いずれにしろF30における低ベース照射出力がグループF間の破損状況の差異に何らかの影響を与えていることは確かである。

グループG20は, 燃料仕様のうち最もペレットの熱的安定性がすぐれている。しかしながら, ペレットの変形などを考慮すると, 逆にその熱的安定性のためスウェリングなどによって被覆管内応力状態をきびしくする方向となり, これによつてたとえばグループA20より低い破損抵抗となったと思われる。なおグループAとGではペレット形状が異り, この影響も充分考えることができる。ペレットの形状としてはグループAおよびEのCD型がFおよびGのCFDm型よりよさそうである。

グループE10の破損抵抗はA10より小さい。両グループ間に燃料特性上めだつた差異はなく, またベース照射条件からもそれ程大きな相異はない。これらグループ間の破損状況については今

後さらに検討する予定である。

2) 各燃料グループ内における様相

各グループ内では破損状況とランプ出力の値に何等の矛盾も生じていない。

燃料棒 A10/3 および E10/3 と E10/4 ではランプ照射におけるランプ速度を通常の値(100 W/cm²・min) よりかなり遅くして実験された。こうすることにより PCI によって生じる被覆管内応力を軽減し得るので、破損抵抗は増大するはずである。現に E10/3, E10/4 は非破損であり、E10/2 (破損) に対してそれを実証することができた。なおこの2本の燃料棒における応力状態の特殊性は解析結果 (Fig.5 参照) にもよく表われている。

4.3 変形挙動

燃料棒における変形は、燃料試料の特性および照射条件の基盤にたつて、各燃料グループ間あるいはグループ内で比較的矛盾のない様相を示している。

ベース照射後データとしてのクリープダウン、リッジ形成、棒長変化、スタック長変化などの様相も定性的に充分考えられるもので、また前4.2節にふれた F20 および F30 グループ間の変形の差異も予想どおり変形上の差となって現われている。

ランプ照射後の変形ではグループ F に他のものと異った様相がみられる。特にリッジ形成については A および E グループに比較してかなり顕著であった。

4.4 FP放出挙動

FP ガスのペレット外放出挙動は PCI/SCC 破損の1因でもある環境に関連する重要なものである。STOR プロジェクトで実験した KWU/CE 社提供6燃料グループの非破損燃料棒における FP ガス放出率では 1) グループ A20 および F20 に対する挙動、2) A10, E10 および F30 に対する挙動および 3) G20 に対する挙動、の3つの挙動に分別可能であった。さらにこれらの分類はペレット内ポーアの粒界集積半径についてのデータとも1応対応している。燃料グループについてのこのような分類可能なことは、多分、何等か異なる FP ガス放出モデルが寄与しているものと察せられるが、現時点において、その理由は明らかでない。これは今後の課題のひとつである。

コード FEMAXI-III による解析で採用したものはビタンザモデルであるが、これによると上述の3つに分類された放出率実測値はほとんど全て同一の曲線(放出率対ペレット中心温度あるいはランプ出力)上にプロットされる。これについても放出モデルを今後検討すること、およびそれに基づいて再び解析することにより、放出モデルの相異が明らかにされるものと考えられる。

4.5 今後の課題

以上、前章および本章に記述したうち現時点において未着手の検討、あるいは計画している解

析などを含めて、今後の課題を以下にまとめる。

1) コード FEMAXI-III による解析

各燃料棒における照射履歴等を忠実にインプットし、さらに F P ガス放出モデルを再考して破損、変形および F P 放出各挙動を解析すること。

2) データ編集による総括

実験データに計算データを加え、かつ解析シナリオを再検討して各燃料グループあるいは各燃料棒の P C I / S C C 挙動をデータ編集コード S T R I P で総括すること。

5. 結 言

PWR 冷却水条件でベース照射を行い、ひき続いて同条件でランプ照射を行った結果、S T O R プロジェクトでは燃料破損およびこれに関連する種々の事柄について多くの知見を得ることができた。中には現時点において解釈の困難なものも多々存在するが、これらのことも含めて、第 2 章の目的に記述した項目に従って以下に総括する。

S T O R プロジェクトにおける第一の目的は破損挙動と設計・材料パラメータの相関を知ることであった。このため K W U / C E 棒では異なる 4 種の燃料グループ (A, E, G および F) が試験された。燃料試料特性の破損挙動への効果を把握できたことは S T O R プロジェクトにおける主要成果のひとつである。大粒径にすることにより予想どおり F P ガス放出率を極端に軽減することができた (G 20)。ペレットの形状としては標準型 (A および E) が特殊型 (F および G) よりよさそうである。被覆管の特性も燃料棒の変形挙動に比較的大きく作用している。試料の設計、材料パラメータのひとつひとつが何等かの形で P C I / S C C 挙動に関連しており、これらを確認し得た意義は大きいと考えている。

第二の目的は破損挙動と照射条件の関連を明らかにすることであった。ランプ出力に対して、少なくとも各燃料グループ内においては、全く矛盾のない系統的破損挙動をみることができ、これは大きな成果のひとつである。またランプ速度を遅くした場合破損抵抗が増大することも実証された。しかしながら燃料グループ間の挙動については実験データの解釈困難な点も 2, 3 存在する。この場合、ベース照射条件、とくにベース照射出力履歴の影響していることが察せられる。この寄与をより深く知るためには燃料挙動のコード解析 (たとえば F E M A X I - I I I) の手段を待たざるを得ない。本報でも予備的な解析を行っているが、さらに詳しい解析を行う必要がある。いずれにしろ諸データに照射条件の関連性が現われており、S T O R プロジェクトにおけるひとつの目的が達成されたものと思われる。

目的の第三は破損の系統性、モデルおよび機構の探求であったが、全体的にみて系統性を知り得たものと考えている。少なくとも系統性の定性的解釈は可能である。しかしながらモデルの確立、機構の解明を完全なものとするためにはコードによる解析をより深く、かつ多く実施しなければならない。これは今後の課題として残されている。

第四の目的は破損解析、燃料モデリングへのデータ提供であった。これについてはこの S T O

Rプロジェクトでも多くの貢献をしている。第三の目的と共に、得られた多くのデータの有効利用に期待する。

序言に述べたようにSTORプロジェクトは大きな5つのプロジェクトのうちのひとつである。STORプロジェクトからの知見は既に公表されているインターランプ計画、またほとんどの計画を終了したデモランプ1, 2およびスーパーランプ計画からの情報と首尾一貫しており、それらの計画からの成果を参照し、検討することにより、また新しい違った知見が加えられるかも知れない。

謝 辞

STORプロジェクトを無事完了し、多くの情報を得たことは、全て、国内外の多くの関係諸氏の協力によるものである。こゝに深く謝意を表したい。

参 考 資 料

- (1) 菊地 章, 市川達生, "インターランプ計画の研究成果," 日本原子力学会誌 Vol.23, NO.7, PP507~516 (1981)
- (2) 中島鉄雄他, "FEMAXI-III一軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード," JAERI-M 9251 (1981)
- (3) 菊地 章, "スタズビック・データ編集コードSTRIP," JAERI-M 83-163 (1983)
- (4) オーバーランプ計画報告, STOR-1~STOR-37 (著者研究室保管)

Table 1 Remarks for the Table 2.1 to Table 3.3

SPC (Specification)	STACK.....Fuel stack length
	GAP.....P/C gap
	FORM.....STAND ,DISH, DICH, ANNUL
	ODP.....Outer diameter of pellet
	POP.....% Open porosity
	PSL.....Pellet stack length
	DENS.....Pellet density
	DEN.INC....Density increase
	GS.....Pellet grain size
	ODC.....Outer diameter of cladding
	FN.....FN value
	THICK.....Clad thickness
	CHARAC.....Clad character
IRR (Irradiation)	BP1.....Base power 1st cycle
	EP2.....Base power 2nd cycle
	BP3.....Base power 3rd cycle
	BP4.....Base power 4th cycle
	BPM.....Base power max. or ave.
	BURNUP.....Burnup
	CPL.....Conditioning power level
	TCPL.....Time for CPL
	RTL.....Ramp terminal level
	RPR.....Rate of power ramping
	HOLD.....Holding time for RTL
	TFPD.....Time to FP detection
	F/NF.....Failure or no-failure
NDE (Non-destructive)	RLPTR.....Rod length prior to ramp
	RLAR.....Rod length after ramp
	RLD1.....RLPTR-Initial
	RLD2.....RLAR-RLPTR
	PSLPTR.....Pellet stack...PTR
	PSLAR.....Pellet stack...AR
	PSLD1.....PSLPTR-Initial
	PSLD2.....PSLAR-PSLPTR
	DCDBM.....Dia chan during base Mid
	DCDRM.....Dia chan during ramp Mid
	DCDBI.....Dia chan during base Inter
	DCDRI.....Dia chan during ramp Inter
	PIE (Post irradiation)
FGR.XE.....Fission gas release Xe	
DISH.F.....Final dish width	
GS.F.....Final grain size	
CRACK.D....Depth of crack	
CERAMO.....Report on ceramograph	
ORFR.....Onset radius of restruct.	
GAMMA.....Report on gamma spectro.	
NR.....Report on neutron radio.	
RHDB.....Ridge height Base	
RHDR.....Ridge height Ramp	

Table 2.1 Data summary for the groups A10 and A20

ROD NAME		A10/1.0R	A10/2.0R	A10/3.0R	A10/4.0R	XXXXXXXX	A20/1.0R	A20/2.0R	A20/3.0R	A20/4.0R
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
STACK (SPC)	(MM)	390.051	390.101	390.151	390.15		390.151	390.051	389.951	390.15
GAP (SPC)	(MM)	0.1351	0.1381	0.1371	0.138		0.1341	0.1341	0.1341	0.134
FORM (SPC)		DICH1	DICH1	DICH1	DICH		DICH1	DICH1	DICH1	DICH
QDP (SPC)	(MM)	9.1581	9.1581	9.1581	9.158		9.1581	9.1581	9.1581	9.158
POP (SPC)	(%)	66.01	66.01	66.01	66.0		66.01	66.01	66.01	66.0
PSL (SPC)	(MM)	321.001	320.801	320.351	320.95		319.601	320.951	320.551	321.05
DENS (SPC)	(G/CM3)	10.271	10.271	10.271	10.27		10.271	10.271	10.271	10.27
DEN.INC (SPC)	(G/CM3)	0.071	0.071	0.071	0.07		0.071	0.071	0.071	0.07
GS (SPC)	(MIC)	6.01	6.01	6.01	6.0		6.01	6.01	6.01	6.0
ODC (SPC)	(MM)	10.7481	10.7531	10.7531	10.753		10.7411	10.7541	10.7511	10.748
FN (SPC)	(--)	0.081	0.081	0.081	0.08		0.081	0.081	0.081	0.08
THICK (SPC)	(MM)	0.721	0.721	0.721	0.72		0.701	0.701	0.701	0.70
CHARAC (SPC)		SR.M1	SR.M1	SR.M1	SR.M		SR.M1	SR.M1	SR.M1	SR.M
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
BP1 (IRR)	(W/CM)	2531	2521	2461	232		2361	2361	2311	221
BP2 (IRR)	(W/CM)	---1	---1	---1	---		2421	2511	2441	233
RTL (IRR)	(W/CM)	4901	4451	5301	525		4401	5151	4881	487
BP4 (IRR)	(W/CM)	---1	---1	---1	---		---1	---1	---1	---
BPM (IRR)	(W/CM)	2531	2521	2461	232		2421	2511	2441	233
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	13.121	13.041	12.721	12.00		24.811	25.221	24.721	23.35
CPL (IRR)	(W/CM)	3001	3001	3051	300		3001	3001	3001	300
TCPL (IRR)	(HR)	721	721	691	72		791	721	721	72
RTL (IRR)	(W/CM)	4901	4451	5301	525		4401	5151	4881	487
RPR (IRR)	(W/CM.M)	1021	931	4.61	102		961	961	961	95
HOLD (IRR)	(MIN)	14401	14401	19001	1440		14401	1421	14401	1440
TFPD (IRR)	(MIN)	---1	---1	---1	---		---1	1281	---1	---
F/NF (IRR)		NF1	NF1	NF1	NF		NF1	F1	NF1	NF
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
RLPTR (NDE)	(MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
RLAR (NDE)	(MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
RLD1 (NDE)	(MM)	0.551	0.501	0.601	0.55		1.101	0.951	1.051	0.95
RLD2 (NDE)	(MM)	0.21	0.11	0.01	0.0		0.11	---	0.11	0.0
PSLPTR (NDE)	(MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
PSLAR (NDE)	(MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
PSLD1 (NDE)	(MM)	1.81	1.91	1.81	1.8		1.31	1.31	1.21	1.3
PSLD2 (NDE)	(MM)	1.11	0.81	0.01	0.4		0.51	0.41	0.51	0.6
DCDBM (NDE)	(MIC)	29.AV1	27.AV1	24.AV1	24.AV		42.AV1	36.AV1	34.AV1	24.AV
DCDRM (NDE)	(MIC)	36.AV1	---1	---1	---		---1	---1	---1	---
DCDB1 (NDE)	(MIC)	?1	---1	---1	---		?1	?1	?1	?
DCDR1 (NDE)	(MIC)	?1	---1	---1	---		?1	?1	?1	?
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
FGR.KR (PIE)	(%)	19.6T1	13.0T1	---1	22.8T		17.3T1	---1	25.3T1	26.5T
FGR.XE (PIE)	(%)	19.6T1	13.0T1	---1	22.8T		17.3T1	---1	25.3T1	26.5T
DISH.F (PIE)	(MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
GS.F (PIE)	(MIC)	---1	---1	---1	---		15.4C1	---1	22.2C1	---
CRACK.D (PIE)	(%)	0?1	---1	---1	---		---1	---1	---1	---
CERAMO (PIE)		OR-221	OR-221	OR-221	OR-22		*OR-291	OR-291	*OR-291	OR-29
ORFR (PIE)	(R/R)						0.711		0.751	
GAMMA (PIE)		OR- 61	OR- 61	OR- 61	OR-6		OR-161	OR-161	OR-161	OR-16
NR (PIE)		OR- 61	OR- 61	OR- 61	OR-6		OR-161	OR-161	OR-161	OR-16
RHDB (PIE)	(MIC)	0.001	0.001	0.001	0.00		0.001	0.001	0.001	0.00
RHDR (PIE)	(MIC)	91	3.91	3.51	2.8		5.11	7.11	8.21	7.9
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****

Table 2.2

Data summary for the groups E10 and G20

ROD NAME		E10/1.0R	E10/2.0R	E10/3.0R	E10/4.0R	XXXXXXXX	G20/1.0R	G20/2.0R	G20/3.0R	G20/4.0R
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
STACK (SPC)	(MM)	390.00	390.00	390.10	390.15		390.18	390.16	390.18	390.13
GAP (SPC)	(MM)	0.140	0.139	0.142	0.142		0.143	0.146	0.144	0.144
FORM (SPC)		DICH	DICH	DICH	DICH		DICH.M	DICH.M	DICH.M	DICH.M
ODP (SPC)	(MM)	9.158	9.158	9.158	9.158		9.144	9.144	9.144	9.144
POP (SPC)	(%)	66.0	66.0	66.0	66.0		42.8	42.8	42.8	42.8
P5L (SPC)	(MM)	320.85	320.85	320.65	320.60		315.10	314.90	314.90	314.90
DENS (SPC)	(G/CM3)	10.27	10.27	10.27	10.27		10.42	10.42	10.42	10.42
DEN.INC (SPC)	(G/CM3)	0.07	0.07	0.07	0.07		0.00	0.00	0.00	0.00
GS (SPC)	(MIC)	6.0	6.0	6.0	6.0		22.0	22.0	22.0	22.0
ODC (SPC)	(MM)	10.746	10.745	10.746	10.745		10.743	10.744	10.740	10.742
FN (SPC)	(--)	0.09	0.09	0.09	0.09		0.03	0.03	0.03	0.03
THICK (SPC)	(MM)	0.72	0.72	0.72	0.72		0.73	0.73	0.73	0.73
CHARAC (SPC)		SR.H	SR.H	SR.H	SR.H		SR.H	SR.H	SR.H	SR.H
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
BP1 (IRR)	(W/CM)	243	243	238	227		235	230	231	215
BP2 (IRR)	(W/CM)	---	---	---	---		247	244	245	228
RTL (IRR)	(W/CM)	445	475	525	525		420	445	482	435
BP4 (IRR)	(W/CM)	---	---	---	---		---	---	---	---
BPM (IRR)	(W/CM)	242	243	238	227		247	244	245	228
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	12.61	12.61	12.30	12.70		24.60	24.19	24.27	22.62
CPL (IRR)	(W/CM)	300	300	300	300		300	300	290	300
TCPL (IRR)	(HR)	72	72	72	72		72	80	72	72
RTL (IRR)	(W/CM)	445	475	525	525		420	445	482	435
RPR (IRR)	(W/CM.M)	99	84	0.49	4.7		55	85	95	85
HOLD (IRR)	(MIN)	1440	69	1440	1440		1440	1440	10	10.5
TFPD (IRR)	(MIN)	---	46	---	---		---	---	5	---
F/NF (IRR)		NF	F	NF	NF		NF	NF	F	NF
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
RLPTR (NDE)	(MM)	?	?	?	?		?	?	?	?
RLAR (NDE)	(MM)	?	?	?	?		?	?	?	?
RLD1 (NDE)	(MM)	0.70	0.75	0.70	0.45		1.42	1.39	1.42	1.42
RLD2 (NDE)	(MM)	-0.1	0.1	0.1	-0.4		---	---	---	---
PSLPTR (NDE)	(MM)	?	?	?	?		?	?	?	?
PSLAR (NDE)	(MM)	?	?	?	?		?	?	?	?
PSLD1 (NDE)	(MM)	1.7	1.8	1.9	1.6		-0.4	0.0	1.0	0.0
PSLD2 (NDE)	(MM)	0.4	0.0	0.2	0.4		0.0	---	---	---
DCDBM (NDE)	(MIC)	32.AV	31.AV	31.AV	24.AV		40.0	30.0	34.0	31.0
DCDRM (NDE)	(MIC)	---	---	---	---		6.8	10.8	12.9	4.6
DCDBI (NDE)	(MIC)	---	---	---	---		31	28	26	26
DCDRI (NDE)	(MIC)	---	---	---	---		14.4	18.7	21.0	11.3
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
FGR.KR (PIE)	(%)	---	---	24.8	---		1.8	2.9	---	0.9
FGR.XE (PIE)	(%)	---	---	24.8	?		1.8	2.9	---	0.9
DISH.F (PIE)	(MM)	?	?	?	---		480	270	70	510
GS.F (PIE)	(MIC)	---	10C	---	---		---	22	---	22
CRACK.D (PIE)	(%)	---	?	---	---		?	?	?	?
CERAMO (PIE)		OR-22	*OR-22	OR-22	OR-22		OR-36	*OR-36	OR-36	*OR-36
DRFR (PIE)	(R/R)	0.63	0.63	0.63	0.63		0.60	0.60	0.60	0.55
GAMMA (PIE)		OR-6	OR-6	OR-6	OR-6		OR-28	OR-28	OR-28	OR-28
NR (PIE)		OR-6	OR-6	OR-6	OR-6		OR-28	OR-28	OR-28	OR-28
RHDB (PIE)	(MIC)	0.00	0.00	0.00	0.00		11.0	10.0	5.6	5.6
RHDR (PIE)	(MIC)	4.9	3.6	6.0	4.8		15.5	17.3	11.5	11.5
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****

Table 2.3 Data summary for the groups F20 and F30

ROD NAME		F20/1.0R	F20/2.0R	F20/3.0R	F20/4.0R	XXXXXXX	F30/S.0R	F30/1.0R	F30/2.0R	F30/4.0R
BLANK	(PIE) *****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
STACK	(SPC) (MM)	390.051	390.001	390.001	390.00		389.951	390.051	390.051	390.00
GAP	(SPC) (MM)	0.1661	0.1661	0.1661	0.164		0.1701	0.1701	0.1721	0.172
FORM	(SPC) (MM)	DICH.M1	DICH.M1	DICH.M1	DICH.M		DICH.M1	DICH.M1	DICH.M1	DICH.M
ODP	(SPC) (MM)	9.1151	9.1151	9.1151	9.115		9.1151	9.1151	9.1151	9.115
POP	(SPC) (%)	8.91	8.91	8.91	8.9		8.91	8.91	8.91	8.9
PSL	(SPC) (MM)	321.001	320.401	320.801	320.30		320.901	320.801	320.251	320.37
DENS	(SPC) (G/CM3)	10.411	10.411	10.411	10.41		10.411	10.411	10.411	10.41
DEN.INC	(SPC) (G/CM3)	0.141	0.141	0.141	0.14		0.141	0.141	0.141	0.14
GS	(SPC) (MIC)	4.51	4.51	4.51	4.5		4.51	4.51	4.51	4.5
ODC	(SPC) (MM)	10.7481	10.7511	10.7531	10.751		10.7411	10.7411	10.7421	10.743
FN	(SPC) (---)	0.091	0.091	0.091	0.09		0.091	0.091	0.091	0.09
THICK	(SPC) (MM)	0.701	0.701	0.701	0.70		0.701	0.701	0.701	0.70
CHARAC	(SPC) (SR.S1)	SR.S1	SR.S1	SR.S1	SR.S		SR.S1	SR.S1	SR.S1	SR.S
BLANK	(PIE) *****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
BP1	(IRR) (W/CM)	2321	2321	2271	217		1981	2021	2011	195
BP2	(IRR) (W/CM)	2501	2511	2581	242		2211	2231	2181	201
RTL	(IRR) (W/CM)	5081	4661	4321	394		4851	3781	4111	445
BP4	(IRR) (W/CM)	---	---	---	---		---	---	---	---
BPM	(IRR) (W/CM)	2501	2511	2581	242		2211	2231	2181	201
BURNUP	(IRR) (GWD/TU)	25.061	25.251	25.061	23.86		30.711	31.271	30.881	29.08
CPL	(IRR) (W/CM)	3001	3001	3001	295		2951	3001	3001	300
TCPL	(IRR) (HR)	721	721	721	72		721	721	721	72
RTL	(IRR) (W/CM)	5081	4661	4321	394		4851	3781	4111	445
RPR	(IRR) (W/CM.M)	961	961	961	95		901	851	1151	90
HOLD	(IRR) (MIN)	91	91	221	1440		81	14401	6831	1174
TFPD	(IRR) (MIN)	21	21	91	---		3.51	---	---	---
F/NF	(IRR) (FI)	FI	FI	FI	NF		FI	NFI	NFI	NF
BLANK	(PIE) *****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
RLPTR	(NDE) (MM)	?1	?1	?1	?		?1	?1	?1	?
RLAR	(NDE) (MM)	?1	?1	?1	?1		?1	?1	?1	?1
RLD1	(NDE) (MM)	0.751	0.801	0.801	0.85		1.001	1.001	1.001	1.00
RLD2	(NDE) (MM)	0.01	0.11	-0.31	---		---	---	---	---
PSLPTR	(NDE) (MM)	?1	?1	?1	?1		?1	?1	?1	?1
PSLAR	(NDE) (MM)	?1	?1	?1	?1		?1	?1	?1	?1
PSLD1	(NDE) (MM)	0.01	1.11	1.11	1.9		0.81	0.41	0.51	0.5
PSLD2	(NDE) (MM)	0.11	0.01	0.01	---		---	0.31	0.21	0.2
DCDBM	(NDE) (MIC)	32.AV1	31.AV1	31.AV1	26.AV		36.AV1	40.AV1	36.AV1	29.AV
DCDRM	(NDE) (MIC)	37.AV1	?1	?1	?1		---	---	---	---
DCDBI	(NDE) (MIC)	?1	?1	?1	?1		?1	?1	?1	?1
DCDRI	(NDE) (MIC)	?1	?1	?1	?1		?1	?1	?1	?1
BLANK	(PIE) *****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****
FGR.KR	(PIE) (%)	---	---	4.9T1	9.6T		---	3.3T1	8.0T1	12.9T
FGR.XE	(PIE) (%)	---	---	4.9T1	9.6T		---	3.3T1	8.0T1	12.9T
DISH.F	(PIE) (MM)	401	401	1201	50		301	5501	4001	50
GS.F	(PIE) (MIC)	---	---	7.7C1	10.1C		---	---	---	9.3C
CRACK.D	(PIE) (%)	?1	?1	?1	YES ?		?1	?1	?1	?1
CERAMO	(PIE) (R/R)	OR-291	OR-291	*OR-291	*OR-29		OR-361	OR-361	OR-361	*OR-36
ORFR	(PIE) (R/R)	1	1	0.641	0.60		1	1	1	0.65
GAMMA	(PIE) (R/R)	OR-161	OR-161	OR-161	OR-16		OR-281	OR-281	OR-281	OR-28
NR	(PIE) (R/R)	OR-161	OR-161	OR-161	OR-16		OR-281	OR-281	OR-281	OR-28
RHDB	(PIE) (MIC)	0.01	0.01	0.01	0.0		0.01	0.01	0.01	0.0
RHDR	(PIE) (MIC)	211	7.81	5.81	6.5		7.11	6.31	6.41	5.0
BLANK	(PIE) *****	*****	*****	*****	*****		*****	*****	*****	*****

Table 3.1 Data editing ED1 and ED2

*** EDIT ***		ED1			ED2			
ROD NAME	XXXXXXXX	A20/2.0R	G20/3.0R	F20/3.0R	XXXXXXXX	A20/3.0R	G20/2.0R	F20/4.0R
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)		F	F	F		NF	NF	NF
RTL (IRR)	(W/CM)	515	482	432		488	445	394
TFPD (IRR)	(MIN)	128	5	9		---	---	---
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BPM (IRR)	(W/CM)	251	245	258		244	244	242
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	25.22	24.27	25.06		24.72	24.19	23.86
RTL (IRR)	(W/CM)	515	482	432		488	445	394
RPR (IRR)	(W/CM.M)	96	95	96		96	85	95
HOLD (IRR)	(MIN)	142	10	22		1440	1440	1440
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
FORM (SPC)		DICH	DICH.M	DICH.M		DICH	DICH.M	DICH.M
GAP (SPC)	(MM)	0.134	0.144	0.165		0.134	0.146	0.164
DEN.INC (SPC)	(G/CM3)	0.07	0.00	0.14		0.07	0.00	0.14
POP (SPC)	(%)	66.0	42.8	8.9		66.0	42.8	8.9
GS (SPC)	(MIC)	6.0	22.0	4.5		6.0	22.0	4.5
CHARAC (SPC)		SR.M	SR.H	SR.S		SR.M	SR.H	SR.S
FN (SPC)	(--)	0.08	0.03	0.09		0.08	0.03	0.09
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BP1 (IRR)	(W/CM)	236	231	227		231	230	217
BP2 (IRR)	(W/CM)	251	245	258		244	244	242
BP3 (IRR)	(W/CM)	---	---	---		---	---	---
BP4 (IRR)	(W/CM)	---	---	---		---	---	---
BPM (IRR)	(W/CM)	251	245	258		244	244	242
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	25.22	24.27	25.06		24.72	24.19	23.86
RLD1 (NDE)	(MM)	0.95	1.42	0.80		1.05	1.39	0.85
PSLD1 (NDE)	(MM)	1.3	1.0	1.1		1.2	0.0	1.9
DCDBM (NDE)	(MIC)	36.AV	34.0	31.AV		34.AV	30.0	26.AV
DCDBI (NDE)	(MIC)	?	26	?		?	28	?
RHDB (PIE)	(MIC)	0.00	5.6	0.0		0.00	10.0	0.0
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)		F	F	F		NF	NF	NF
CPL (IRR)	(W/CM)	300	290	300		300	300	295
TCPL (IRR)	(HR)	72	72	72		72	80	72
RTL (IRR)	(W/CM)	515	482	432		488	445	394
RPR (IRR)	(W/CM.M)	96	95	96		96	85	95
HOLD (IRR)	(MIN)	142	10	22		1440	1440	1440
TFPD (IRR)	(MIN)	128	5	9		---	---	---
RLD2 (NDE)	(MM)	---	---	-0.3		0.1	---	---
PSLD2 (NDE)	(MM)	0.4	---	0.0		0.5	---	---
DCDRM (NDE)	(MIC)	---	12.9	?		---	10.8	?
DCDRI (NDE)	(MIC)	?	21.0	?		?	18.7	?
RHDR (PIE)	(MIC)	7.1	11.5	5.8		8.2	17.3	6.5
FGR.KR (PIE)	(%)	---	---	4.9T		25.3T	2.9T	9.6T
FGR.XE (PIE)	(%)	---	---	4.9T		25.3T	2.9T	9.6T
DISH.F (PIE)	(MM)	?	70	120		?	270	50
ORFR (PIE)	(R/R)	---	---	0.64		0.75	0.60	0.60
GS.F (PIE)	(MIC)	---	---	7.7C		22.2C	22	10.1C
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

ROD NAME	XXXXXXXX	A10/3.0R	A20/2.0R	XXXXXXXX	A10/1.0R	A20/3.0R	XXXXXXXX	A10/1.0R	E10/2.0R
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)		NFI	F		NFI	NF		NFI	F
RTL (IRR)	(W/CM)	530I	515		490I	488		490I	475
TFPD (IRR)	(MIN)	---	128		---	---		---	46
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BPM (IRR)	(W/CM)	246I	251		253I	244		253I	243
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	12.72I	25.22		13.12I	24.72		13.12I	12.61
RTL (IRR)	(W/CM)	530I	515		490I	488		490I	475
RPR (IRR)	(W/CM.M)	4.6I	96		102I	96		102I	84
HOLD (IRR)	(MIN)	1900I	142		1440I	1440		1440I	69
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
FORM (SPC)		DICH	DICH		DICH	DICH		DICH	DICH
GAP (SPC)	(MM)	0.137I	0.134		0.135I	0.134		0.135I	0.139
DEN.INC (SPC)	(G/CM3)	0.07I	0.07		0.07I	0.07		0.07I	0.07
PQP (SPC)	(%)	66.0I	66.0		66.0I	66.0		66.0I	66.0
GS (SPC)	(MIC)	6.0I	6.0		6.0I	6.0		6.0I	6.0
CHARAC (SPC)		SR.MI	SR.M		SR.MI	SR.M		SR.MI	SR.H
FN (SPC)	(--)	0.08I	0.08		0.08I	0.08		0.08I	0.09
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BP1 (IRR)	(W/CM)	246I	236		253I	231		253I	243
BP2 (IRR)	(W/CM)	---	251		---	244		---	---
BP3 (IRR)	(W/CM)	---	---		---	---		---	---
BP4 (IRR)	(W/CM)	---	---		---	---		---	---
BPM (IRR)	(W/CM)	246I	251		253I	244		253I	243
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)	12.72I	25.22		13.12I	24.72		13.12I	12.61
RLD1 (NDE)	(MM)	0.60I	0.95		0.55I	1.05		0.55I	0.75
PSLD1 (NDE)	(MM)	1.8I	1.3		1.8I	1.2		1.8I	1.8
DCDBI (NDE)	(MIC)	24.AVI	36.AV		29.AVI	34.AV		29.AVI	31.AV
DCDBI (NDE)	(MIC)	---	?		?	?		?	---
RHDB (PIE)	(MIC)	0.00I	0.00		0.00I	0.00		0.00I	0.00
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)		NFI	F		NFI	NF		NFI	F
CPL (IRR)	(W/CM)	305I	300		300I	300		300I	300
TCPL (IRR)	(HR)	69I	72		72I	72		72I	72
RTL (IRR)	(W/CM)	530I	515		490I	488		490I	475
RPR (IRR)	(W/CM.M)	4.6I	96		102I	96		102I	84
HOLD (IRR)	(MIN)	1900I	142		1440I	1440		1440I	69
TFPD (IRR)	(MIN)	---	128		---	---		---	46
RLD2 (NDE)	(MM)	0.0I	---		0.2I	0.1		0.2I	0.1
PSLD2 (NDE)	(MM)	0.0I	0.4		1.1I	0.5		1.1I	0.0
DCDRM (NDE)	(MIC)	---	---		36.AVI	---		36.AVI	---
DCDR1 (NDE)	(MIC)	---	?		?	?		?	---
RHDR (PIE)	(MIC)	3.5I	7.1		9I	8.2		9I	3.6
FGR.KR (PIE)	(%)	---	---		19.6TI	25.3T		19.6TI	---
FGR.XE (PIE)	(%)	---	---		19.6TI	25.3T		19.6TI	---
DISH.F (PIE)	(MM)	?	?		?	?		?	?
ORFR (PIE)	(R/R)	---	---		---	0.75		---	0.63
GS.F (PIE)	(MIC)	---	---		---	22.2C		---	10C
BLANK (PIE)	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

*** EDIT ***			ED6			ED7			
ROD NAME	XXXXXXXX		F30/4.0R	F20/2.0R	F30/2.0R	XXXXXXXX	A20/1.0R	G20/2.0R	F20/3.0R
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)			NFI	FI	NF		NFI	NFI	F
RTL (IRR)	(W/CM)		445	466	411		440	445	432
TFPD (IRR)	(MIN)		---	2	---		---	---	9
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BPM (IRR)	(W/CM)		201	251	218		242	244	258
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)		29.08	25.25	30.88		24.81	24.19	25.06
RTL (IRR)	(W/CM)		445	466	411		440	445	432
RPR (IRR)	(W/CM.M)		90	96	115		96	85	96
HOLD (IRR)	(MIN)		1174	9	683		1440	1440	22
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
FORM (SPC)			DICH.M	DICH.M	DICH.M		DICH.M	DICH.M	DICH.M
GAP (SPC)	(MM)		0.172	0.166	0.172		0.134	0.146	0.165
DEN-INC (SPC)	(G/CM3)		0.14	0.14	0.14		0.07	0.00	0.14
POP (SPC)	(%)		8.9	8.9	8.9		66.0	42.8	8.9
GS (SPC)	(MIC)		4.5	4.5	4.5		6.0	22.0	4.5
CHARAC (SPC)			SR.S	SR.S	SR.S		SR.M	SR.H	SR.S
FN (SPC)	(--)		0.09	0.09	0.0		0.08	0.03	0.09
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
BP1 (IRR)	(W/CM)		195	232	201		236	230	227
BP2 (IRR)	(W/CM)		201	251	218		242	244	258
BP3 (IRR)	(W/CM)		165	---	177		---	---	---
BP4 (IRR)	(W/CM)		---	---	---		---	---	---
BPM (IRR)	(W/CM)		201	251	218		242	244	258
BURNUP (IRR)	(GWD/TU)		29.08	25.25	30.88		24.81	24.19	25.06
RLD1 (NDE)	(MM)		1.00	0.80	1.00		1.10	1.39	0.80
PSLD1 (NDE)	(MM)		0.5	1.1	0.5		1.3	0.0	1.1
DCDBM (NDE)	(MIC)		29.AV	31.AV	36.AV		42.AV	30.0	31.AV
DCDBI (NDE)	(MIC)		?	?	?		?	28	?
RHDB (PIE)	(MIC)		0.0	0.0	0.0		0.00	10.0	0.0
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
F/NF (IRR)			NFI	FI	NF		NFI	NFI	F
CPL (IRR)	(W/CM)		300	300	300		300	300	300
TCPL (IRR)	(HR)		72	72	72		79	80	72
RTL (IRR)	(W/CM)		445	466	411		440	445	432
RPR (IRR)	(W/CM.M)		90	96	115		96	85	96
HOLD (IRR)	(MIN)		1174	9	683		1440	1440	22
TFPD (IRR)	(MIN)		---	2	---		---	---	9
RLD2 (NDE)	(MM)		---	0.1	---		0.1	---	-0.3
PSLD2 (NDE)	(MM)		0.2	0.0	0.2		0.5	---	0.0
DICDRM (NDE)	(MIC)		---	?	---		---	10.8	?
DICDRI (NDE)	(MIC)		?	?	?		?	18.7	?
RHDR (PIE)	(MIC)		5.0	7.8	6.4		5.1	17.3	5.8
FGR.KR (PIE)	(%)		12.9T	---	8.0T		17.3T	2.9T	4.9T
FGR.XE (PIE)	(%)		12.9T	---	8.0T		17.3T	2.9T	4.9T
DISH.F (PIE)	(MM)		50	40	400		?	270	120
ORFR (PIE)	(R/R)		0.65		---		0.71	0.60	0.64
GS.F (PIE)	(MIC)		9.3C	---	---		15.4C	22	7.7C
BLANK (PIE)	*****		*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

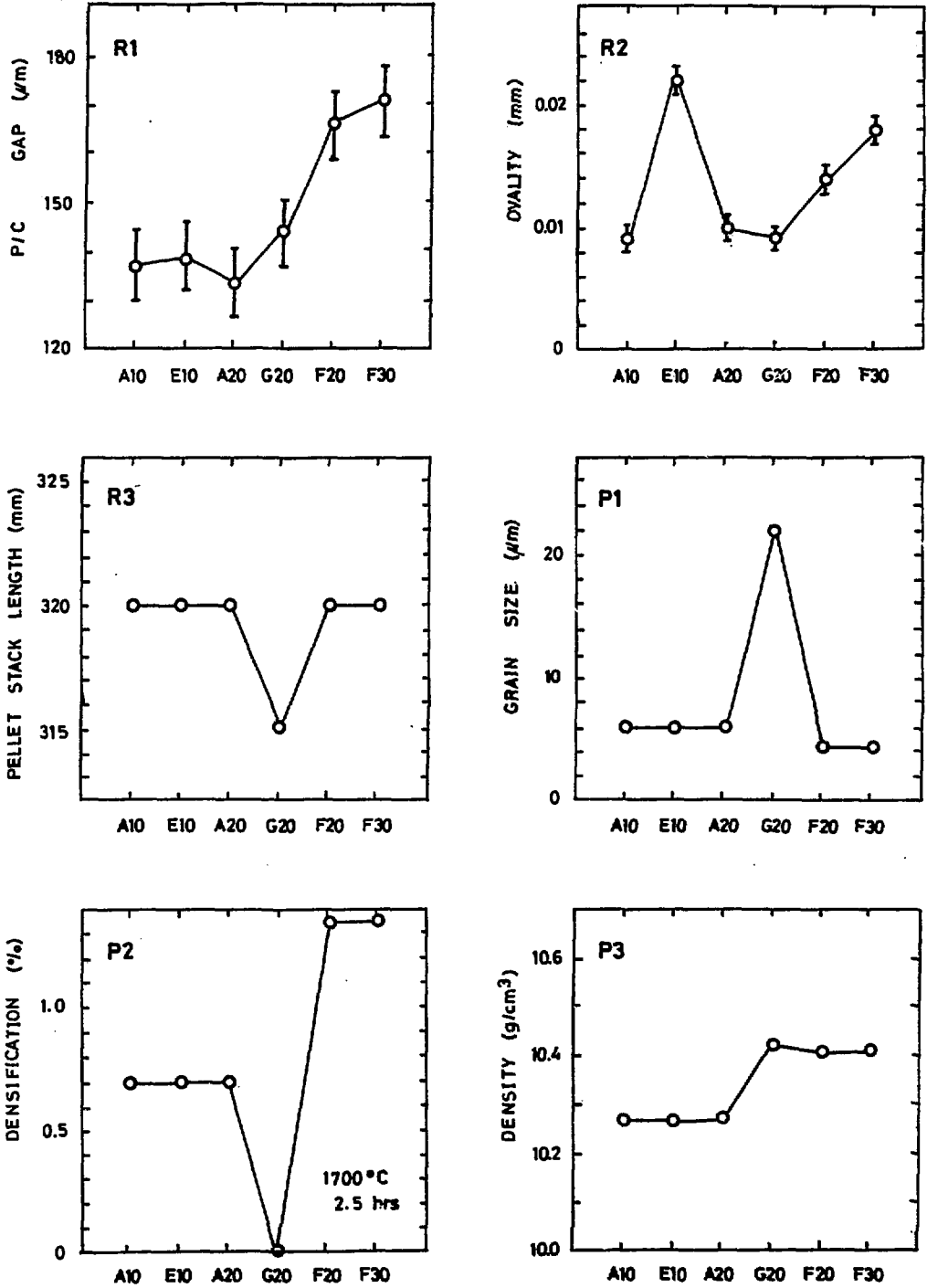


Fig. 1 Pre-irradiation characteristics in KWU/CE rods (R1, R2, R3, P1, P2 and P3)

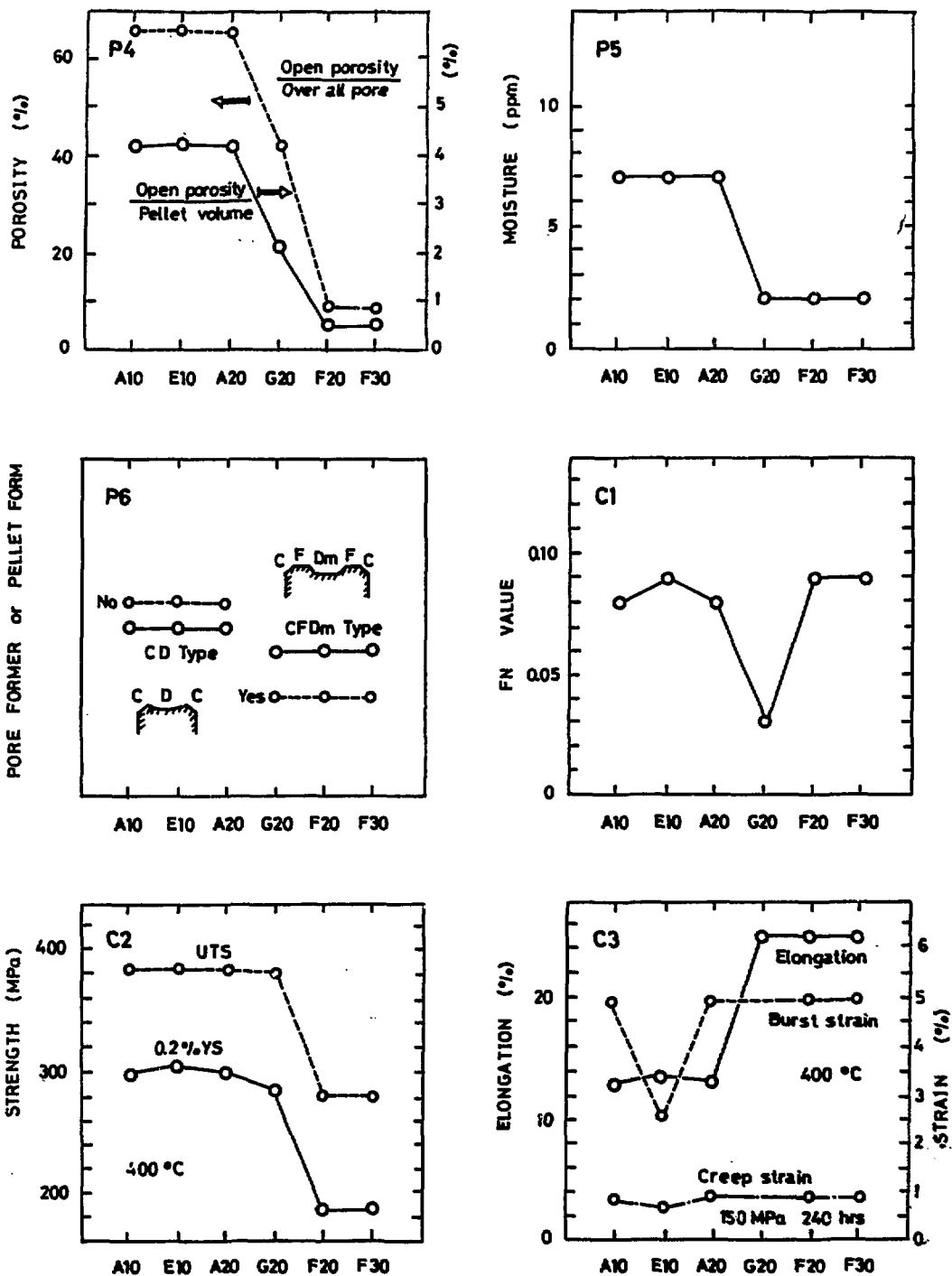


Fig. 1 (Conti.) Pre-irradiation characteristics in KWU/CE rods (P4, P5, P6, C1, C2 and C3)

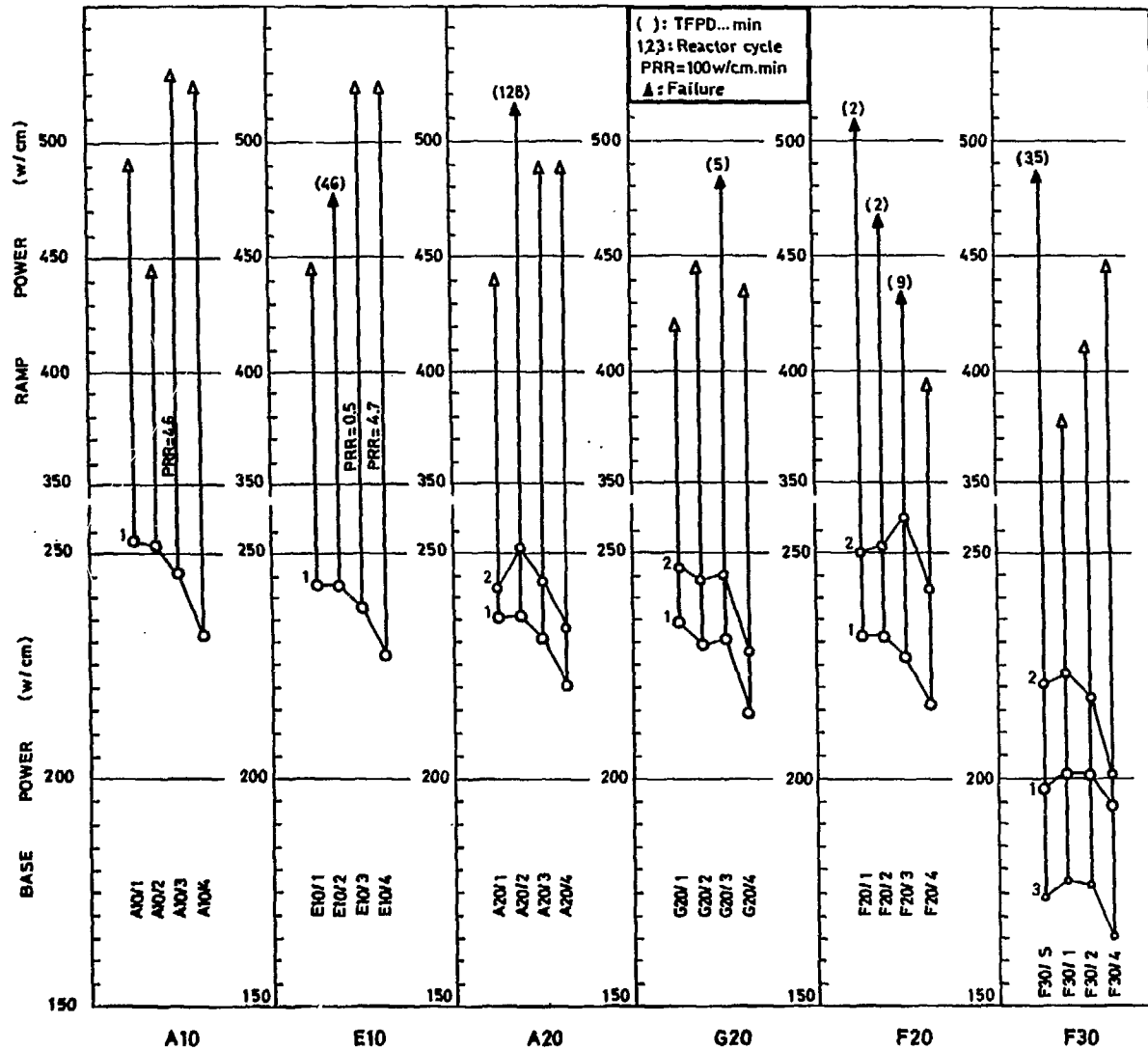


Fig. 2 Base and ramp irradiation data in KWU/CE rods

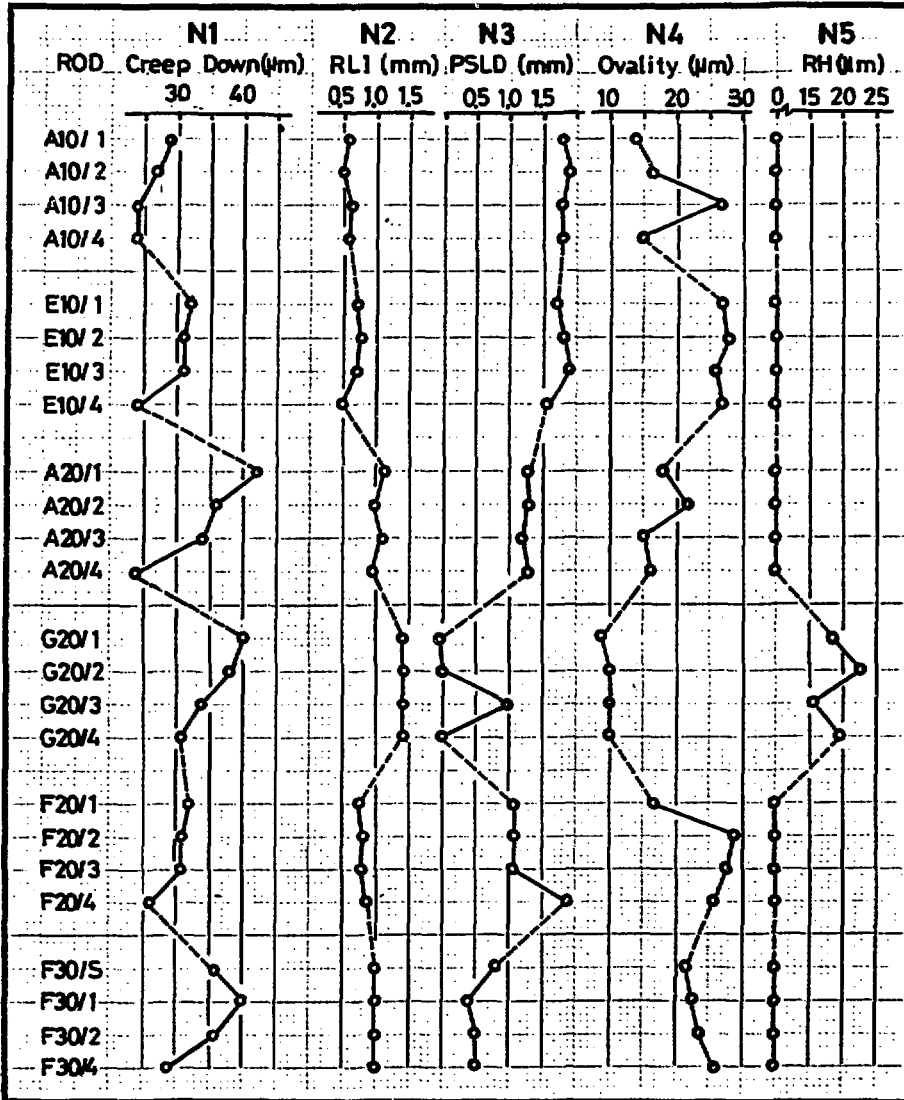


Fig. 3 NDE data in KWU/CE rods after base irradiation (N1, N2, N3, N4, N5 and N6)

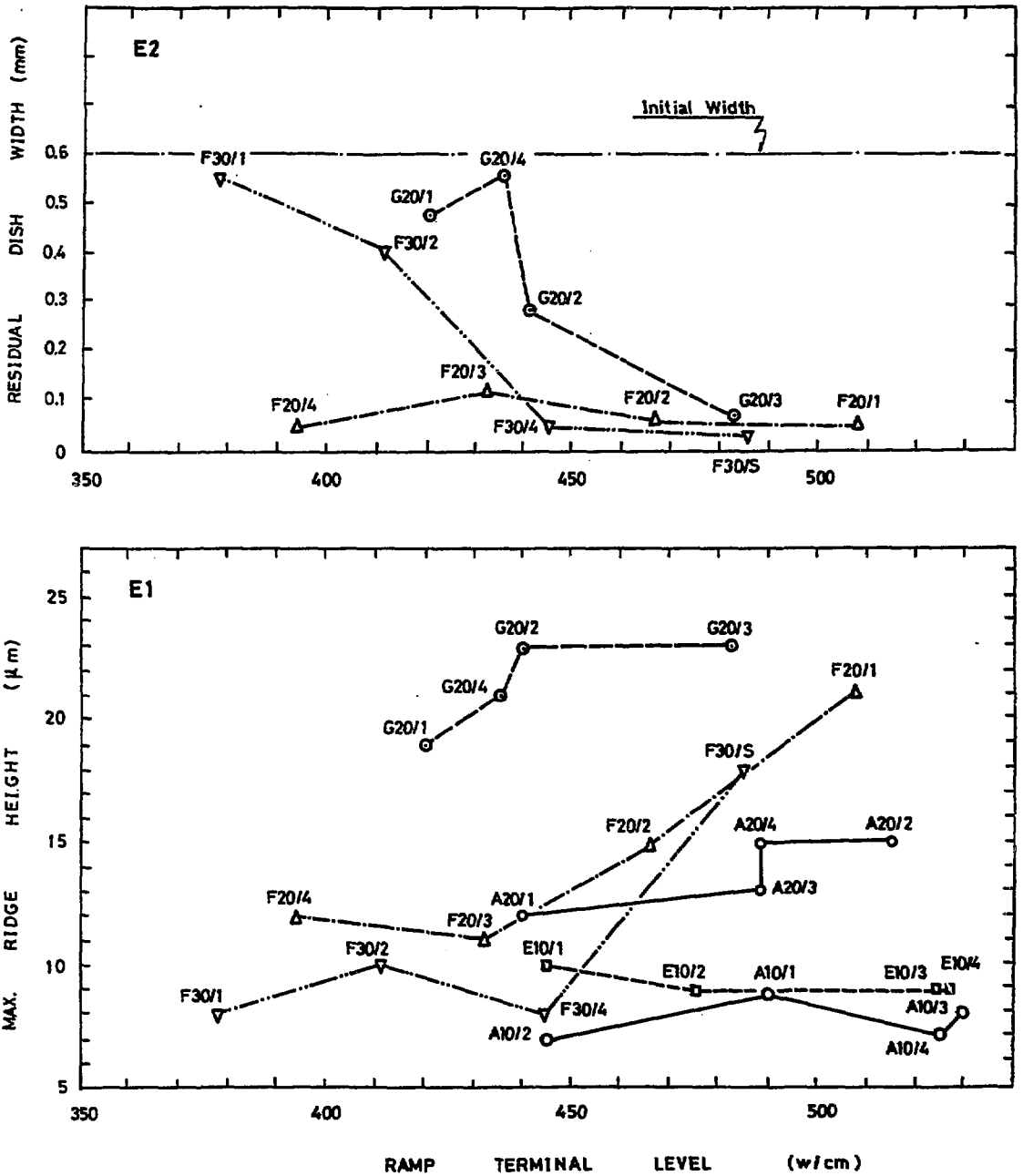


Fig. 4

PIE data in KWU/CE rods after ramp irradiation (E1 and E2)

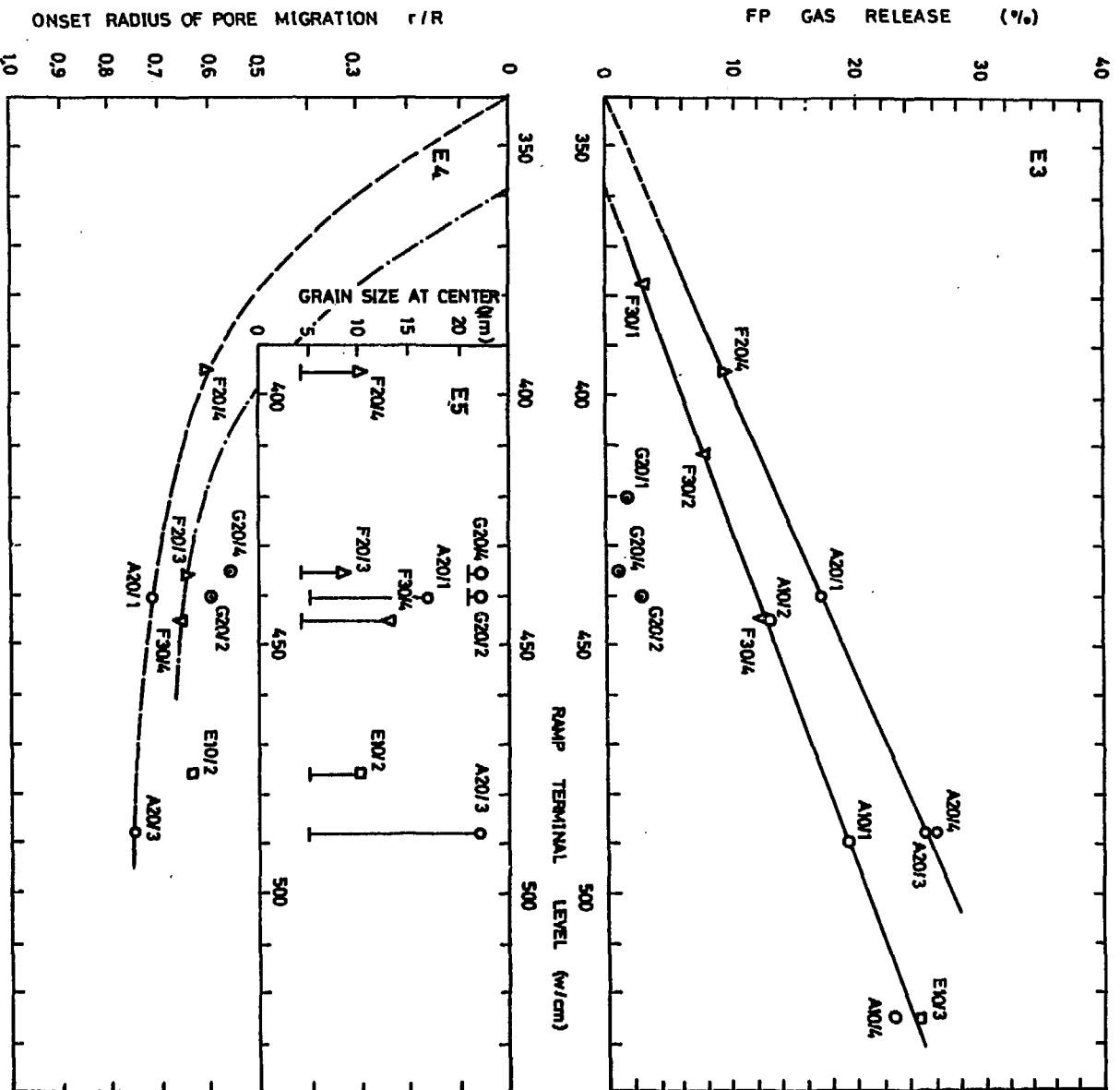


Fig. 4 (Conti.) PIE data in KWU/CE rods after ramp irradiation (E3 and E4)

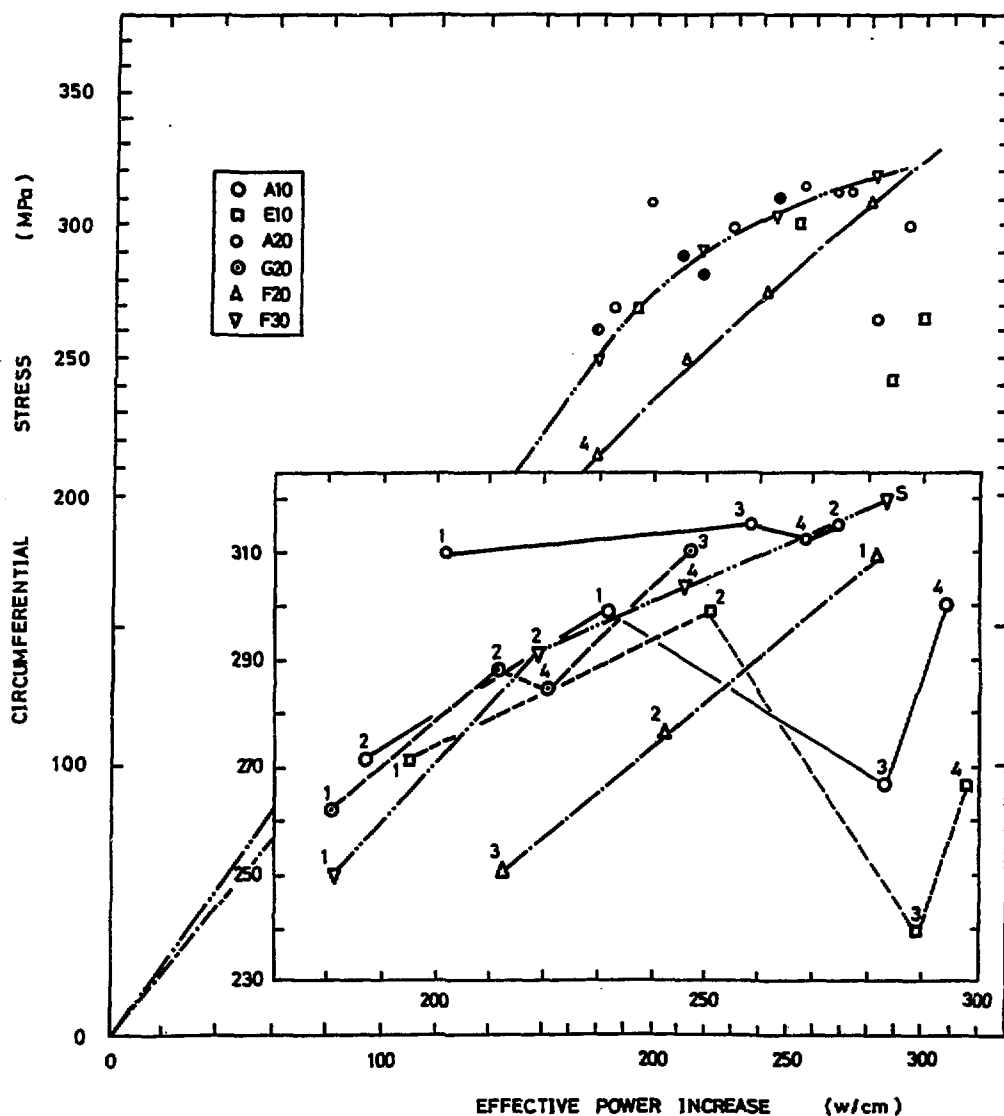


Fig. 5

Circumferential stress (calculated) in the cladding against effective power increase (calculated) : Effective power increase means RTL-Contact power.

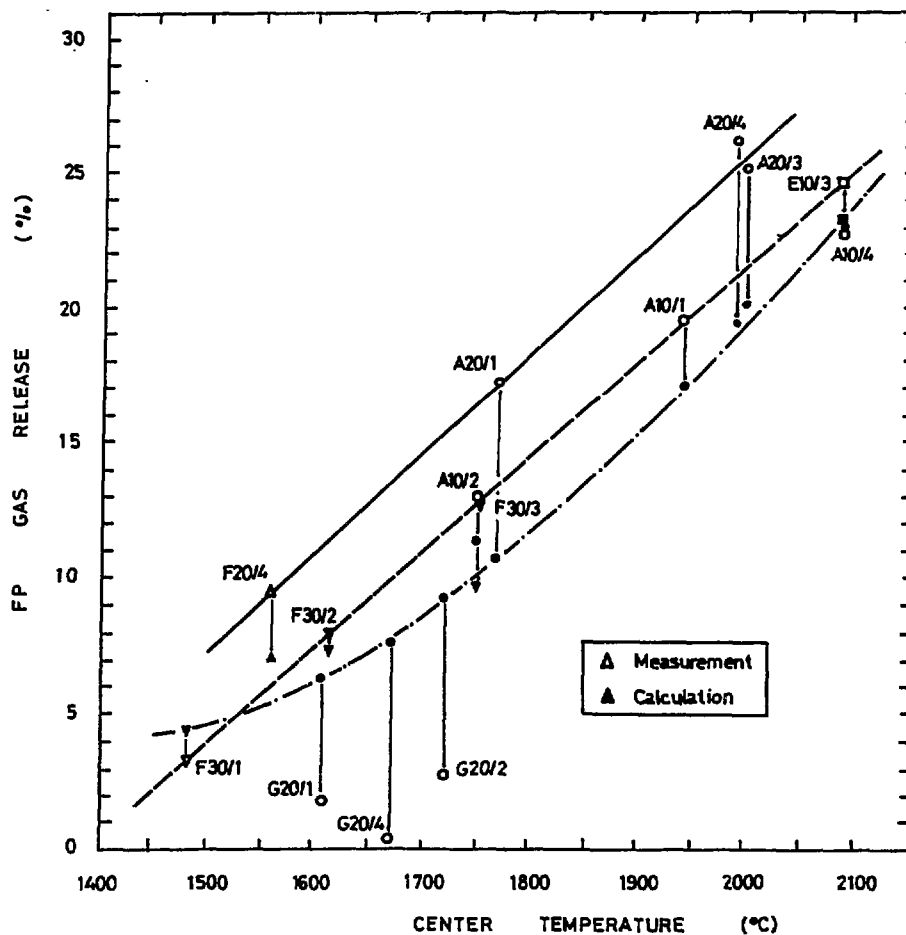


Fig. 6 FP gas release (measured and calculated) against pellet centerline temperature (calculated)