

照射後試験用X線CT検査装置の開発
—「常陽」使用済炉心燃料集合体を用いたホット試験—
(技術報告書)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section ,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,

Japan.

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

1999

照射後試験用 X 線 CT 検査装置の開発

—「常陽」使用済炉心燃料集合体を用いたホット試験— (技術報告書)

永峯 剛* 木村和浩*
中村保雄* 松元慎一郎*

要 旨

照射後試験用 X 線 CT 検査装置(以下 X 線 CT 装置)は、非破壊で照射燃料集合体のバンドルの状態(ラッパ管との相互作用)を調べ健全性確認や燃料寿命評価に反映するため、照射燃料集合体試験室増設施設(以下 FMP 増設施設)に導入した装置である。

本報告書では、「常陽」照射済炉心燃料集合体(PFD512)を用いた撮像試験によるX線CT装置の開発課題として残されていた γ 線の影響と装置性能確認結果について述べる。

- (1) PFD512(集合体平均燃焼度 58,600MWd/t) の CT 像及びスキャノグラム像から、集合体内燃料ピン配列は整然とし、燃料ペレットには中心空孔や亀裂も鮮明に確認できることが明らかになった。このことから燃料からの γ 線の影響は、ほとんど無いことを確認した。
- (2) 「常陽」炉心燃料集合体を通常スキャンモードで撮像する場合の装置性能を ASTMに準じ評価した結果、二点間寸法測定精度は±0.33mm であることを確認した。

*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室
(FMS)

Development of X-ray CT Test Apparatus
for Post Irradiation Examination
— Post Irradiation Examination of Irradiated "JOYO" Subassembly —

Tsuyoshi Nagamine* , Kazuhiro Kimura*
Yasuo Nakamura* , Shinichiro Matsumoto*

Abstract

The X-ray CT test apparatus has been developed as a non-destructive examination device for examining the internal condition of subassembly (Bundle Duct Interaction, etc) and for reflecting to soundness confirmation and fuel-life estimation, and installed in the extension facility of Fuel Monitoring Facility.

In this report, the influence of gamma ray on CT image and post-irradiation examination faculties were evaluated in the case of fuel subassembly (PFD512) irradiated in "JOYO".

- (1) The CT and scanogram image of PFD512 (subassembly average burn up ; 58,600MWD/t) became possible to observe the internal state (arrangement of internal pins , distribution of the central void and crack) of irradiated subassembly. And it is not influenced by gamma rays emitted from an irradiated subassembly.
- (2) If the image ability of normal scan mode is evaluated in method defined by ASTM, the dimensional measurement accuracy is $\pm 0.33\text{mm}$ in the case of "JOYO" subassembly.

* Fuel Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center,
O-Arai Engineering Center, JNC

目 次

1.	はじめに	1
2.	試験方法	2
2.1	X線 CT 装置	2
2.2	X線 CT 装置性能確認方法	9
2.2.1	装置画像性能評価手法	9
2.2.2	照射後試験機能確認方法	13
2.3	取得データ	13
3.	試験結果	14
3.1	試験対象燃料集合体	14
3.2	データ収集	16
3.2.1	集合体の CT 像及びスキャノグラム像	17
3.2.2	性能確認に必要なデータ収集	31
4.	性能評価	35
4.1	装置画像性能評価	35
4.1.1	測定系のノイズ評価	35
4.1.2	装置の画像性能	39
4.1.3	γ 線の影響評価	39
4.2	照射後試験機能の評価	41
4.2.1	集合体内部状況の観察機能	41
4.2.2	燃料ピンの内部状況の観察機能	45
5.	おわりに	50
6.	謝 辞	51
7.	参考文献	52
付録-1	53
(1)	MTF計算式	54
(2)	MTF計算結果	56
付録-2	57
(1)	CDD計算式	58
(2)	CDD計算結果	59

表一覧

表 2 - 1	X線 CT 装置撮像モード一覧	4
表 3 - 1	検出器出力による γ 線の測定結果	31
表 3 - 2	各 X 線透過部の X 線透過データ実測値	34
表 4 - 1	照射後試験用 X 線 CT 装置の画像性能 (「常陽」炉心燃料集合体撮影の場合)	39

図一覧

図 2-1	CT 走査方式の概念	2
図 2-2	走査系の幾何学的配置図	2
図 2-3	X 線 CT 装置施設内配置図	3
図 2-4	各撮像モードによる模擬供試体の CT 像	7
図 2-5	FMF増設施設 X 線 CT 装置の振幅伝達関数	9
図 2-6	横軸を空間分解能とした振幅伝達関数	10
図 2-7	FMF増設施設 X 線 CT 装置のCDD曲線	11
図 3-1	PFD512の製造図面	15
図 3-2	炉内装荷位置図	14
図 3-3	PFD512 CT 撮像位置	16
図 3-4	「常陽」炉心燃料集合体の CT 像及びスキャノグラム像	19
図 3-5	炉心中心部におけるスキャンモードの比較	21
図 3-6	炉心燃料部(微細スキャン 2 モード C)	23
図 3-7	スキャノグラム-X 線RG像比較図	25
図 3-8	燃料ピン頂部におけるスキャノグラム像と連続 CT 像	29
図 3-9	照射線量率及び検出器出力実測結果	32
図 3-10	照射線量率測定状態図	33
図 3-11	X 線透過データ	34
図 4-1	集合体無装荷状態の検出器出力(1 並進データ)	35
図 4-2	γ 線エネルギー-線吸収係数関係図(鉄)	35
図 4-3	X 線透過データ比較図	39
図 4-4	A 面ラッパ管との隙間寸法測定結果	43
図 4-5	集合体内燃料ピンの配列図	45
図 4-6	模擬欠陥と実燃料との CT 値比較	47
図 4-7	各燃料ピン毎の照射情報	49

1. はじめに

照射後試験用X線CT装置は、「もんじゅ」炉心構成要素等の非破壊による内部状況観察を目的として、X線を利用し燃料集合体の断層像を撮像するCT装置として初めてホットラボに適用した。

X線CT装置はこれまで模擬燃料集合体を用いた総合調整試運転によって、基本的な機能及び性能を確認している。

使用済燃料の内部状況観察に適用する際の最重要課題は、被検体から放出される γ 線のCT画像に与える影響であり、FMF増設施設に設置したX線CT装置の使用済燃料への適用性を確認するため、「常陽」照射済燃料集合体(PFD512)を用いた性能確認試験(γ 線影響評価含む)を実施した。本報告書は、性能確認試験の結果をまとめたものである。

2. 試験方法

この章では、FMF 増設施設に設置した照射後試験用 X 線 CT 装置の基本仕様概要¹⁾ 及び装置のホット試験方法について示す。

2. 1 X線 CT 装置

FMF 増設施設に設置した照射後試験用 X 線 CT 装置は、検査体を中心に並進・回転動作を繰返しながら走査する第 2 世代方式であり、検査体の周囲 900 方向からのデータを収集し、計算機により画像を再構成する。CT 走査方式の概念を図 2-1 に、走査系の幾何学的配置図を図 2-2 に示す。

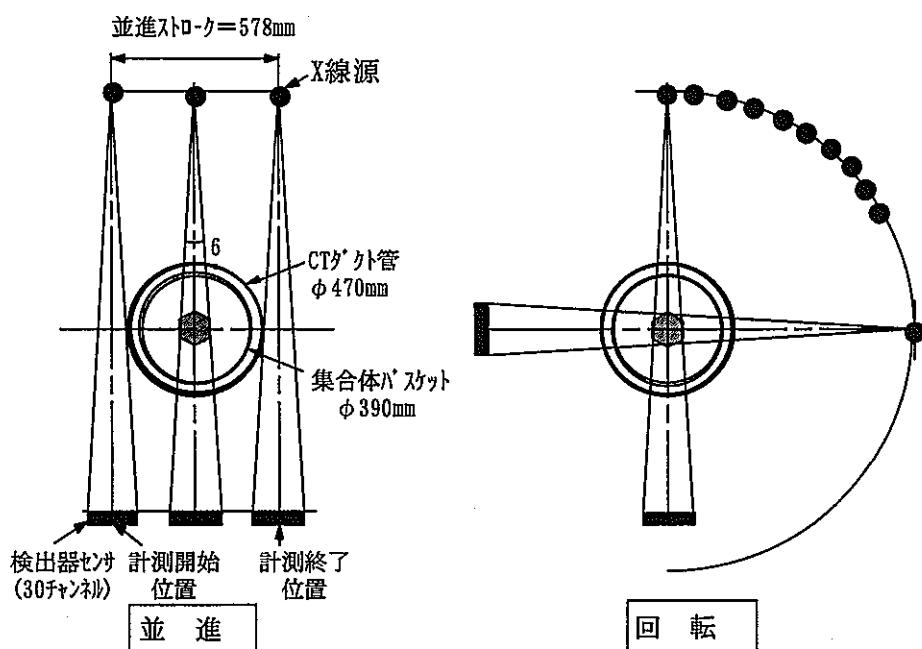


図 2-1 CT 走査方式の概念

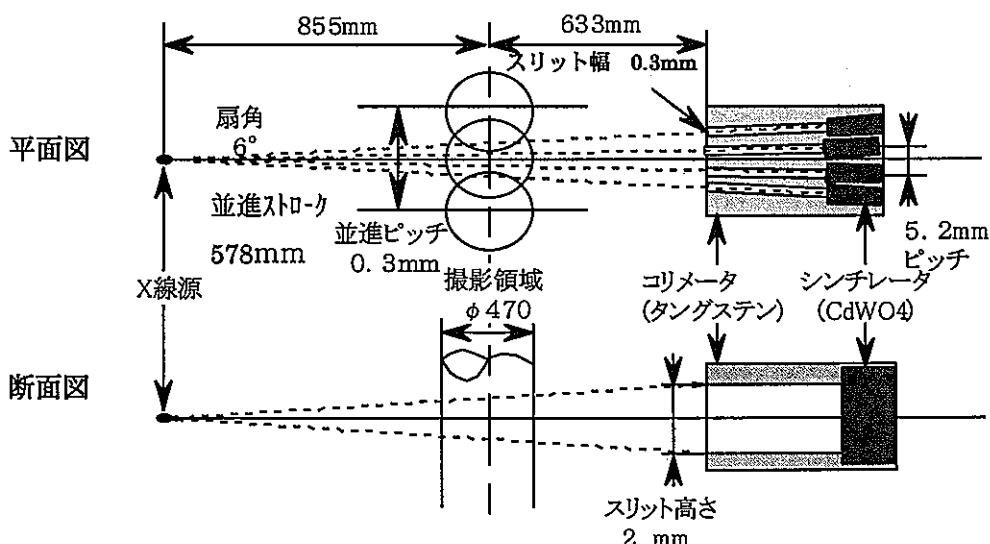


図 2-2 走査系の幾何学的配置図

X線 CT 装置の FMF 増設施設内の配置図を図 2 - 3 に示す。装置構成は大きく分けて、スキャナ、X線発生源、X線検出部、画像処理解析計算機、試料駆動機構、中央制御盤の6つに大別できる。

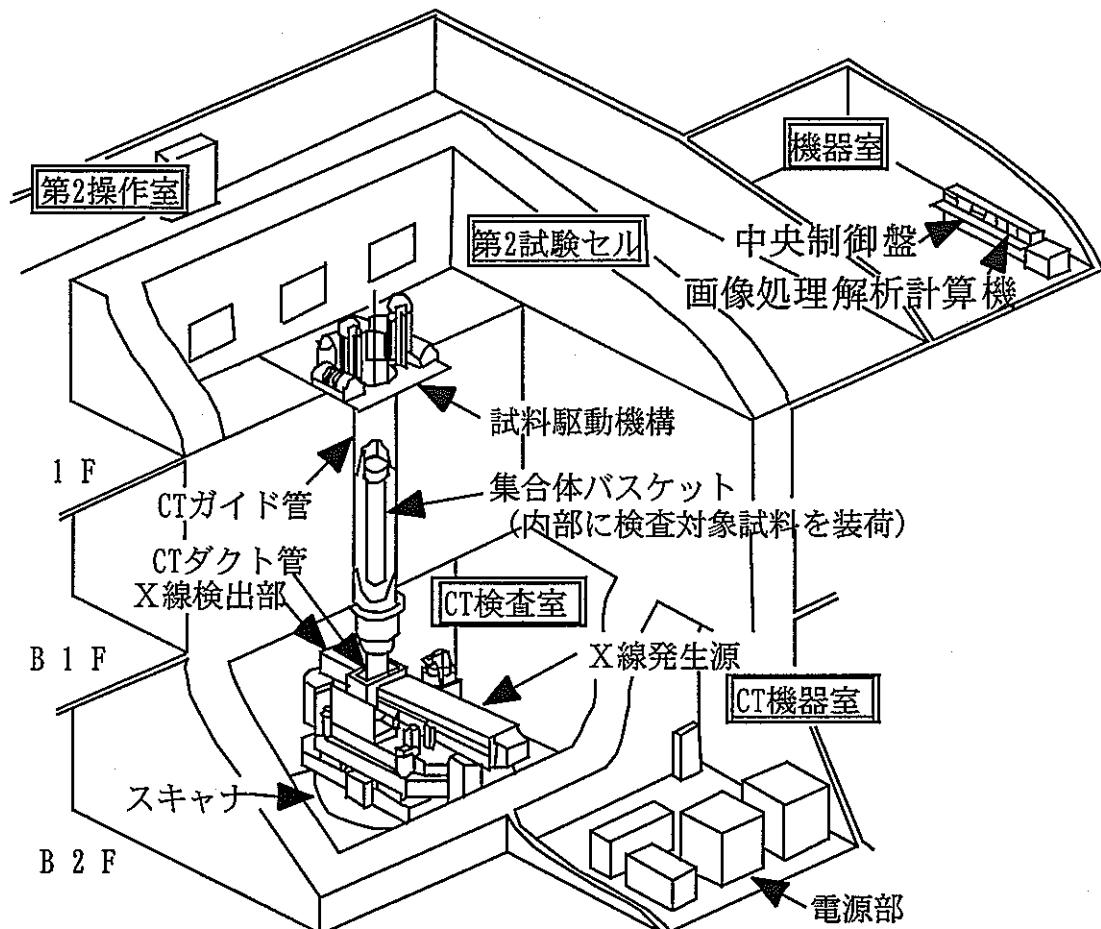


図 2 - 3 X線 CT 装置施設内配置図

X線 CT 装置の撮像モードを表 2 - 1 にまとめた。本装置設置時は、通常スキャンモードのみであったが、画像の高性能化のニーズに応えるために、精密並進、精密角度を導入した。総合調整試運転のなかでこれらスキャンモードの試験を実施し、精密並進によるスキャンモードの効果を確認し、さらに高度化を図った微細スキャンモードを導入し現在に至っている。これら撮像モードの追加は基本的にハード機構の変更は無く、ソフトによる制御機能追加、微細スキャン等のデータ処理に伴う高性能計算機であるワークステーションの導入によるものである。各撮像モードの模擬供試体の CT 像を図 2 - 4 及び概要・特徴を以下に示す。

表2-1 X線CT装置撮像モード一覧

	通常スキャン	精密並進1	精密並進2	精密角度	微細1						微細2		
					モードA	モードB	モードC	モードA	モードB	モードC	モードA	モードB	モードC
サンプリングピッチ (mm)	0.3	0.15	0.15	0.3	0.1						0.03		
プロジェクションピッチ (°)	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2						0.2		
画素サイズ (mm)	0.3	0.3	0.15	0.3	0.1			0.3			0.03		0.3
画像サイズ	1024*1024	1024*1024	2048*2048	1024*1024	3264*3264	1440*1440	3264*3264	1440*1440	1088*1088	480*480	4800*4800	4800*4800	480*480
演算マトリクス	1024*1024	1024*1024	2048*2048	1024*1024	3264*3264	1440*1440	3264*3264	1440*1440	3264*3264	1440*1440	4800*4800	4800*4800	4800*4800
有効視野 (mm)	φ307	φ307	φ307	φ307	φ326	φ144	φ326	φ144	φ326	φ144	φ144	φ144	φ144
スキャン方法*	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	ROI	NORMAL	ROI	NORMAL	ROI	ROI	ROI	ROI
スキャンストローク (mm)	578	578	578	578	578	254	578	254	578	254	246	246	246
スキャナ速度 (mm/min)	2250	1125	1125	2250	750						225		
並進データ数 (1並進)	1926	3972	3972	1896	5780	2540	5780	2540	5780	2540	8200	8200	8200
検出データ数 (1並進)	1896	3942	3942	1866	5750	2510	5750	2510	5750	2510	8170	8170	8170
スキャン時間 (min/1断面)	17	25	25	38	32	20	32	20	32	20	42	42	42
演算時間 (min/1断面)	2	2	2	2	22	5	22	5	3	1	45	45	2
合計時間 (min/1断面)	19	27	27	40	54	25	54	25	35	21	87	87	44

* Normal : 空気層を含めた全エリアのデータを取得後、各並進毎の空気層のデータを基に取得データを補正し、画像再構成を行う。

ROI : 必要エリアのみデータを取得し、画像再構成を行う。取得データの補正是事前に取得した空気層のデータを用いる。

(1) 通常スキャン

スキャナは、並進速度 2250mm/min で移動（データサンプリングピッチ 0.3mm）し、スリット幅と同じ画素サイズ 0.3mm で画像再構成を行う。

本装置設置時からの撮像モードであり基本スキャンモードである。

(2) 精密並進

① 精密並進 1

通常スキャン時の並進速度を 1/2 とすることでデータサンプリングピッチは 0.15mm となる。2 個の取得データを平均化し画素サイズ 0.3mm で画像再構成を行う。通常スキャンよりもコントラストはでるが画像上 0.3mm 以下は確認できない。

（概念） 以下のように平均化して各画素にデータを当てはめていく。

[1,2 の平均]、[2,3 の平均]、[3,4 の平均]、………,[n-1,n の平均]

[] は画素とし、サイズは 0.3mm。

② 精密並進 2

データ取得方法は精密並進 1 と同じだが、画像再構成演算は平均化せず画素サイズ 0.15mm で画像再構成を行う。画像上透過X線量の揺らぎが大きくなり、通常スキャンに比べ不鮮明となる。

(3) 精密角度

このモードは、通常スキャンが 0° ~174° まで回転しデータを取得するのに対し 0° ~174° ~0° と往復でデータを取得し、往路と復路で 0.1° 回転角度をずらしデータを取得する。

(4) 微細スキャン 1

① モード A

通常スキャン時の並進速度を 1/3 とすることでデータサンプリングピッチを 0.1mm とし、画素サイズ 0.1mm で画像再構成を行う。画素サイズ当たりの透過X線量の揺らぎが大きくなるため、通常スキャンに比べ不鮮明となる。

② モード B

データサンプリングピッチはモード A と同じだが、0.1mm でサンプリングしたデータ 3 個を平均化して画素サイズ 0.1mm で画像再構成を行う。3 個のデータを平均化するために透過X線量の揺らぎは小さくなり、通常スキャンより鮮明な画像となる。

（概念） 以下のように平均化して各画素にデータを当てはめていく。

[1,2,3 の平均]、[2,3,4 の平均]、[3,4,5 の平均]、…,[n-2,n-1,n の平均]

[] は画素とし、サイズは 0.1mm。

③ モード C

データサンプリングピッチはモード A と同じだが、3 個のデータを平均化して画素サイズ 0.3mm で画像再構成を行う。3 個のデータを平均化するために透過 X 線量の揺らぎは小さくなりコントラストが鮮明となるが画素の荒さが目立つ。

(概念) 以下のように平均化して各画素にデータを当てはめていく。

[1,2,3 の平均]、[2,3,4 の平均]、[3,4,5 の平均]、…、[n-2,n-1,n の平均]
[] は画素とし、サイズは 0.3mm。

(5) 微細スキャン 2

① モード A

通常スキャン時の並進速度を 1/10 とすることでデータサンプリングピッチを 0.03mm とし、画素サイズ 0.03mm で画像再構成を行う。画素サイズ当たりの透過 X 線量の揺らぎが微細スキャン 1 モード A より大きくなるため、画像が不鮮明となる

② モード B

データサンプリングピッチはモード A と同じだが、10 個のデータを平均化して画素サイズ 0.03mm で画像再構成を行う。10 個のデータを平均化するために透過 X 線量の揺らぎは小さくなり、X 線 CT 装置の撮像モードのうち最も鮮明な画像となるが、1 日 5 断面が撮像限界である。

(概念) 以下のように平均化して各画素にデータを当てはめていく。

[1,2, …, 10 の平均]、[2,3, …, 11 の平均]、[3,4, …, 12 の平均],
…, [n-9,n-8, …, n の平均]
[] は画素とし、サイズは 0.03mm。

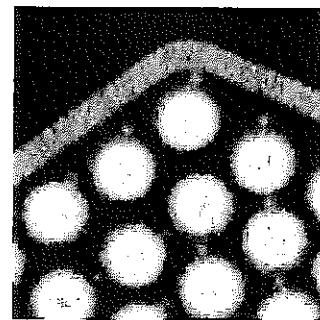
③ モード C

データサンプリングピッチはモード A と同じだが、10 個のデータを平均化して画素サイズ 0.3mm で画像再構成を行う。10 個のデータを平均化するために透過 X 線量の揺らぎは小さくなり、X 線 CT 装置の撮像モードのうちコントラストが鮮明となるが画素の荒さが目立つ。撮像時間と画質を考えた場合最も優れたモードである。

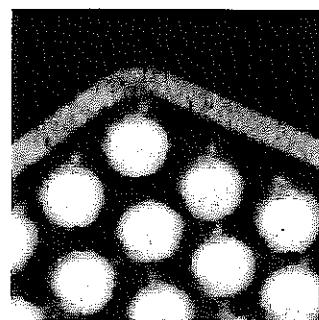
(概念) 以下のように平均化して各画素にデータを当てはめていく。

[1,2, …, 10 の平均]、[2,3, …, 11 の平均]、[3,4, …, 12 の平均],
…, [n-9,n-8, …, n の平均]
[] は画素とし、サイズは 0.3mm。

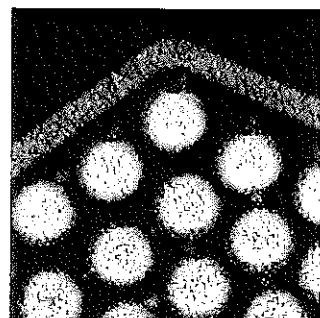
撮像時間、画質等を考慮すると通常スキャン及び微細スキャン 2 モード C が CT 撮像に適している。



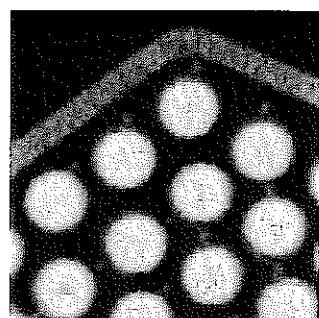
通常スキャン
サンプルリンクピッチ=0.3mm
画素サイズ=0.3mm
演算マトリクス=1024×1024
有効視野=φ 307
撮像時間=19分/1断面



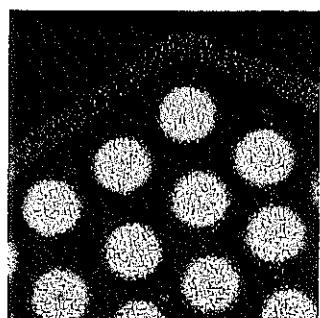
精密並進1
サンプルリンクピッチ=0.15mm
画素サイズ=0.3mm
演算マトリクス=1024×1024
有効視野=φ 307
撮像時間=27分/1断面



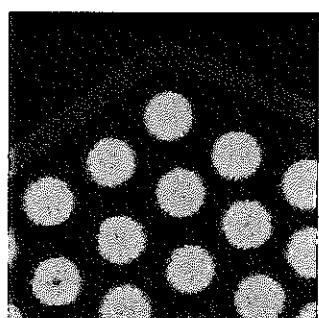
精密並進2
サンプルリンクピッチ=0.15mm
画素サイズ=0.15mm
演算マトリクス=2048×2048
有効視野=φ 307
撮像時間=27分/1断面



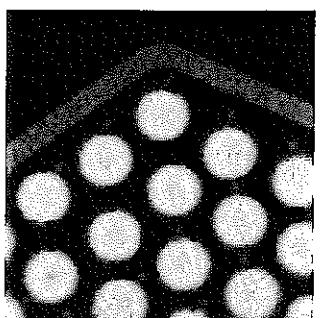
精密角度
サンプルリンクピッチ=0.3mm
画素サイズ=0.3mm
演算マトリクス=1024×1024
有効視野=φ 307
撮像時間=40分/1断面



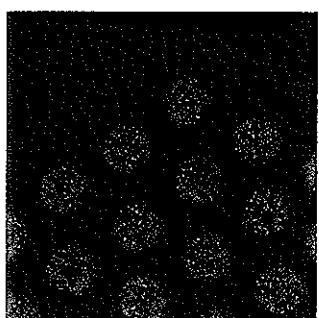
微細スキャン1A
サンプルリンクピッチ=0.10mm
画素サイズ=0.1mm
演算マトリクス=3264×3264
有効視野=φ 326
撮像時間=54分/1断面



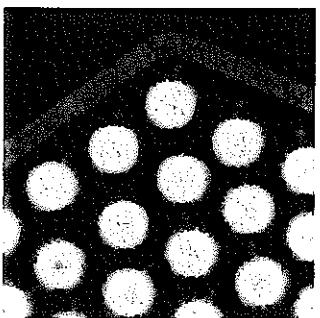
微細スキャン1B
サンプルリンクピッチ=0.10mm
画素サイズ=0.1mm
演算マトリクス=3264×3264
有効視野=φ 326
撮像時間=54分/1断面



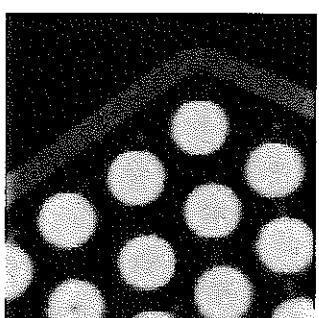
微細スキャン1C
サンプルリンクピッチ=0.10mm
画素サイズ=0.3mm
演算マトリクス=3264×3264
有効視野=φ 326
撮像時間=35分/1断面



微細スキャン2A
サンプルリンクピッチ=0.03mm
画素サイズ=0.03mm
演算マトリクス=4800×4800
有効視野=φ 144
撮像時間=87分/1断面



微細スキャン2B
サンプルリンクピッチ=0.03mm
画素サイズ=0.03mm
演算マトリクス=4800×4800
有効視野=φ 144
撮像時間=87分/1断面



微細スキャン2C
サンプルリンクピッチ=0.03mm
画素サイズ=0.3mm
演算マトリクス=4800×4800
有効視野=φ 144
撮像時間=44分/1断面

図2-4 各撮像モードによる模擬供試体のCT像

2. 2 X線 CT 装置性能確認方法

2.2.1 装置画像性能評価手法

これまでX線 CT 装置の性能は、撮像画像を人が直接観察する官能検査で行っていたために、評価結果の信頼性に限界があった。そのため、国内で一般的な性能評価方法である空間周波数解析すなわち振幅伝達関数 (MTF : Modulation Transfer Function)及び CDD 曲線(Contrast Detail Dose curve)を用いることにした。これは、空間周波数解析を行うことによって得られる結果が物理量なので定量的に装置の性能評価ができるためである。なお本手法は、現在国内で規格化されていないため米国規格である ASTM(American Society for Testing and Materials)²⁾に準じて評価を行なう。本評価方法は被検体が円柱のときであり、形状の複雑な炉心燃料集合体の場合、燃料集合体の最も X 線が吸収される透過方向について評価することで厳しい評価を行うことになる。

(1) 振幅伝達関数 (MTF)

振幅伝達関数 (MTF) とは、X 線 CT 装置の空間周波数特性を示すもので、一般に原像の持つ空間周波数特性に対して再生像 (CT 像) の空間周波数特性は劣るためこの劣化の度合を示すものであり、CT 像上の二点間寸法測定精度の評価ができる。X 線 CT 装置の場合、この振幅伝達関数は、装置の幾何学的配置 (線源の位置とサイズ、検出器の位置等)、撮影条件、再構成演算条件等に依存するもので被検体に依存せず個々の CT 装置で決まるものである。

MTF の計算方法^{2),3)}及び FMF 増設施設に導入した X 線 CT 装置の計算結果を付録-1 に示す。

FMF 増設施設に導入した X 線 CT 装置の振幅伝達関数を図 2-5 に示す。この図の横軸は空間周波数 $f(1/\text{mm})$ を表わしており、振幅伝達関数が 0 % になる空間周波数は、再生像では再現できないことを示している。したがって、この周波数が伝達可能な最大の周波数となる。しかしながら雑音 (ノイズ) が存在する場合には、雑音レベルより小さな振幅伝達関数をもつ空間周波数は、雑音に埋もれてしまい事実上再現できることになる。

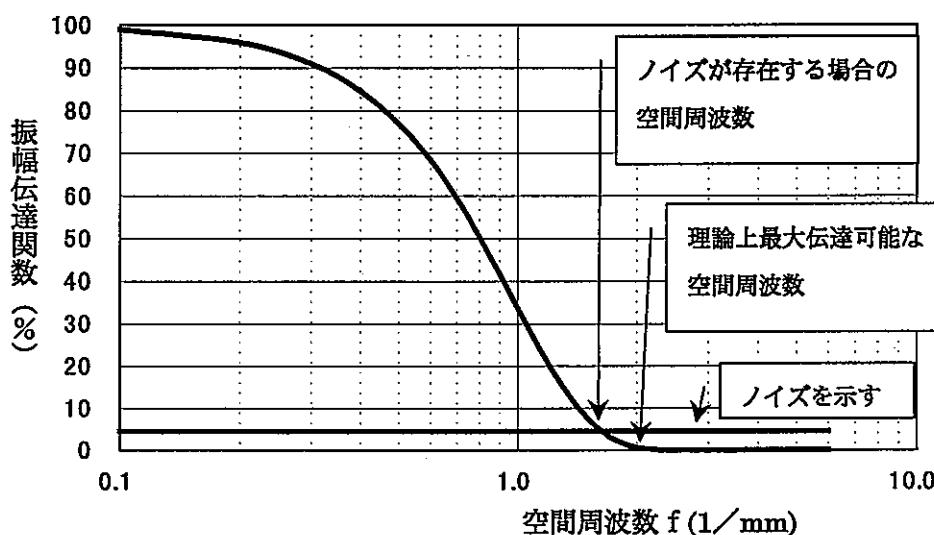


図 2 - 5 FMF 増設施設 X 線 CT 装置の振幅伝達関数

さらに、空間周波数 $f(1/\text{mm})$ と空間分解能 $x (\text{mm})$ は、 $X=1/2f$ の関係式で結ばれている。これから図 2-6 に示すように横軸に空間分解能とすれば直接的に空間分解能が読み取れることになる。

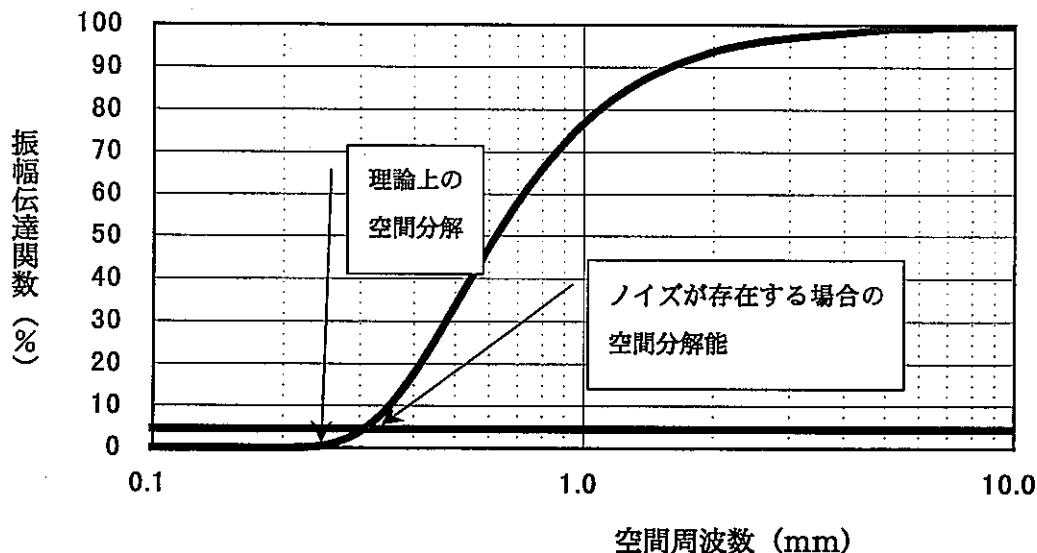


図 2-6 横軸を空間分解能とした振幅伝達関数

以上振幅伝達関数から CT 像上の二点間寸法測定精度を評価する場合は、雑音レベルの評価が重要である。この雑音レベルは、主に X 線検出の統計誤差に起因するため X 線吸収率及び γ 線強度が違う被検体毎に異なる。従って、装置性能の一項目である二点間寸法測定精度は雑音レベルを実測して確認する。

(2) CDD 曲線

CDD 曲線は、振幅伝達関数 (MTF) と画像上の雑音を考慮したもので、欠陥識別能と密度識別能を直接評価できるものである。装置の伝達関数は、先に述べたように被検体とは無関係に決まるが、画像上の雑音は X 線の計測する際の統計誤差であるから被検体に依存する。

CDD 曲線を計算するために必要な情報は、MTF と線源強度、検出効率、射影数及び検査体の減衰率である。

CDD の計算方法^{2),3)}及び FMF 増設施設に導入した X 線 CT 装置の計算結果を付録-2 に示す。FMF 増設施設に導入した X 線 CT 装置の「常陽」燃料集合体を被検体とした場合の CDD 曲線を図 3-7 に示す。図は、空気 (密度 $1.205 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) から識別したい密度と識別するための大きさの関係を示したもので、横軸に識別するに必要な物質の大きさ、縦軸は画像上のコントラストであり、線吸収係数の差と背景物質 (空気) の線吸収係数の比で定義され、線吸収係数は密度とほぼ比例することから実質的には識別したい物質の密度である。例えば、密度が約 8 g/cm^3 の被覆管などのステンレス鋼を識別する場合にはコントラストが $6.6 \times 10^5 \%$ であるため CDD 曲線の交点である直径 0.2mm 以上が必要になる。

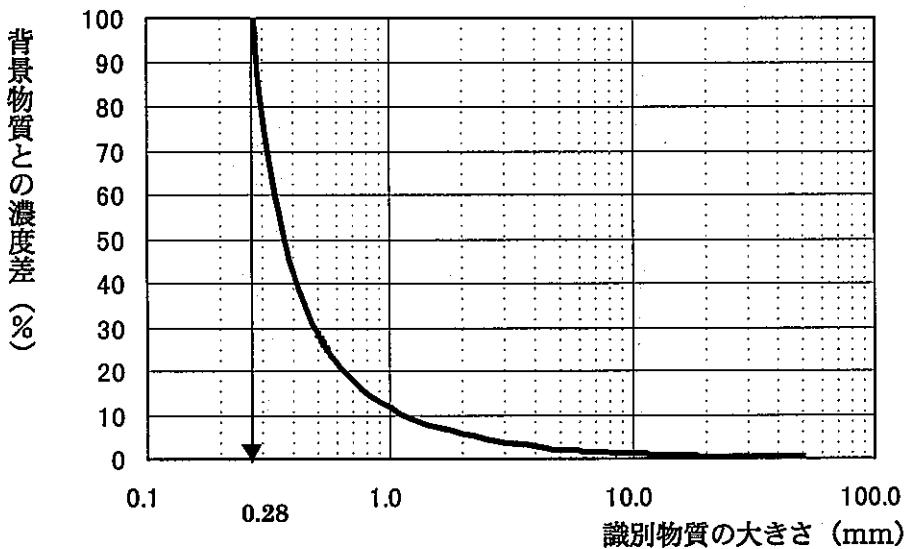


図2-7 FMF増設施設X線CT装置のCDD曲線

(4) 測定系ノイズ評価方法²⁾

X線CT検査装置の画像上のノイズは以下の式によって求められる。また統計的な信頼度を得るためにCT装置の性能を評価する場合、このノイズレベルを 3σ とする。

$$\sigma = \frac{0.71}{s \times \sqrt{V}} \times \sigma_d$$

σ : 画像上のノイズレベル

s : サンプリングピッチ

V : プロジェクション数

σ_d : 入射X線光子計数の相対的誤差

ここで、 σ_d である入射X線光子計数の相対的誤差を求める必要がある。

机上評価の際は、空気層を通過して検出器に入射する光子数を n とすると n の持つ相対誤差は $1/\sqrt{n}$ であり、また被検体を透過した光子数として減衰を考慮して同様に求め、これらの誤差を合算し評価している。(画像再構成演算の際に空気層の光子数から被検体を透過した光子数を差引(バックプロジェクション)処理を行っているため誤差を合算する)

今回は、実際に燃料集合体を透過したX線のデジタル値が実測できることからこの実測値を用い画像上のノイズを求め装置の性能を評価する。透過X線の出力には、透過X線、集合体が放出する γ 線及び暗電流(バックグランド)が含まれていると考え、撮影状態での透過X線出力、X線を発生させずに γ 線のみの出力、暗電流の出力を実測し、 γ 線による影響を評価する。

σ_d の具体的な算出方法は以下の通りである。

① 対象物物性データからの推定 (γ 線を含まない)

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{n} \times \exp(-\mu_0(E) \times R_0)}{n \times \exp(\mu_0(E) \times R_0)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{n}}{n}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{n \times \exp(-\mu_0(E) \times R_0)} + \frac{1}{n}}\end{aligned}$$

n : 空気層を通過してX線検出器に入射する光子数

$\mu_0(E)$: 線吸収係数

R_0 : 透過厚さ

② 実測による評価 (γ 線を含む)

$$\begin{aligned}\sigma_{d\gamma} &= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N_{x(MOX)} + N_{\gamma(MOX)} + N_B}}{N_{x(MOX)} - N_{\gamma(MOX)} - N_B}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_{x(Air)} + N_B}}{N_{x(Air)} - N_B}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{N_{x(MOX)} + N_{\gamma(MOX)} + N_B}{(N_{x(MOX)} - N_{\gamma(MOX)} - N_B)^2} + \frac{N_{x(Air)} + N_B}{(N_{x(Air)} - N_B)^2}}\end{aligned}$$

$N_{x(MOX)}$: 被検体を透過したX線の検出器出力値

$N_{\gamma(MOX)}$: 被検体が発生する γ 線の検出器出力値

N_B : X線を発生せず、かつ被検体がない状態の検出器出力値
(検出器の暗電流流出力値)

$N_{x(Air)}$: 空気層を透過したX線の検出器出力値

③ γ 線による影響

γ 線による寄与分を評価するため、実測結果を基に γ 線が全く入射しないと仮定した光子計数の相対誤差を求め、②の γ 線を含めた相対誤差と比較して γ 線の影響を評価する。

γ 線ノイズの寄与分がないと仮定した場合の光子計数の相対誤差は、以下の式で表せる。

$$\sigma d = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N_{x(MOX)} + N_B}}{(N_{x(MOX)} - N_{\gamma(MOX)} - N_B)} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_{x(Air)} + N_B}}{(N_{x(Air)} - N_B)} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{N_{x(MOX)} + N_B}{(N_{x(MOX)} - N_{\gamma(MOX)} - N_B)^2} + \frac{N_{x(Air)} + N_B}{(N_{x(Air)} - N_B)^2}}$$

2.2.2 照射後試験機能確認方法

X線 CT 装置による照射後試験機能として要求される項目は、集合体及び燃料ピン等の内部状況の観察機能であり、集合体内部状況の観察における着眼点は、

- ① 異物混入の有無
- ② 支持構造物の変形等の有無
- ③ 集合体構成部品の配置・配列の乱れの有無
- ④ BDI 挙動（ピン～ピン（ダクト）の接触の有無）
- ⑤ ピン全長変化

等である。

また、燃料ピン内部状況における着眼点は、中心空孔の有無等である。なお、燃料スタッフ長の長さの測定は、集合体を解体した後に燃料ピンのスキャノグラム像によって求める計画であるが、今回の試験では、集合体を解体しないのでこの機能確認は実施出来ない。

これら集合体を被検体とした照射後試験機能を確認する方法としては、実際に取得した画像の画面上で各着眼点について目視確認することとする。なお、BDI 挙動については、画像解析システムを用いた画像の数値化処理によって燃料ピンの配列座標を定量的に求めることを計画しており、これらの機能も実際に画像解析処理し確認を行う。

2. 3 取得データ

X線 CT 装置のホット試験における取得データを整理すると以下の通りである。

- (1) 「常陽」照射済燃料集合体の CT 像及びスキャノグラム像
 - ・ 集合体の主要構造物の CT 像
 - ・ 集合体全域のスキャノグラム像等
 - ・ ピン頂部等における連続 CT 像
- (2) γ 線の影響を含む装置性能評価のためのデータ収集
 - ・ γ 線の実測
 - ・ X線透過データ(空気層及び集合体透過データ)等

3. 試験結果

3. 1 試験対象燃料集合体

γ 線によるX線 CT 画像への影響確認のために、 γ 線強度の高いほど望ましいことから、高速実験炉「常陽」から入手可能な集合体のなかで最高燃焼度を持つ PFD512 を撮像対象試料として選択した。撮像対象試料の製造図面を図3-1に示す。

本集合体は、100MW 定格出力第 24cy から 31cy の間、照射したもので 24cy から 29cy までは炉心装荷位置[2D2]、29'cy から 31cy の装荷位置は[000]である。

PFD512 の照射条件を図3-2に示す。図中における×印は制御棒位置であり[2D2]に装荷されているときは、C面に制御棒が隣接していた。また、29cy 照射中には B面に照射リグ (PRC050) が装荷 (図中○印) されていた。

照射期間	: 100MW(24cy)~100MW(31cy)
炉内装荷位置	: 2D2(24cy~29cy) 000(29'cy~31cy) 右図参照
燃焼度	: 58,600MWd/t (集合体平均)
ピークフルエンス	: $8.89 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ (E $\geq 0.1 \text{MeV}$)
放射能量	: $1.51 \times 10^{15} \text{Bq/SA}$ (6月21日現在) FP $8.5 \times 10^{14} \text{Bq/SA}$ ACT $6.5 \times 10^{14} \text{Bq/SA}$ 構造材 $8.9 \times 10^{12} \text{Bq/SA}$ (ORIGEN 2計算値)

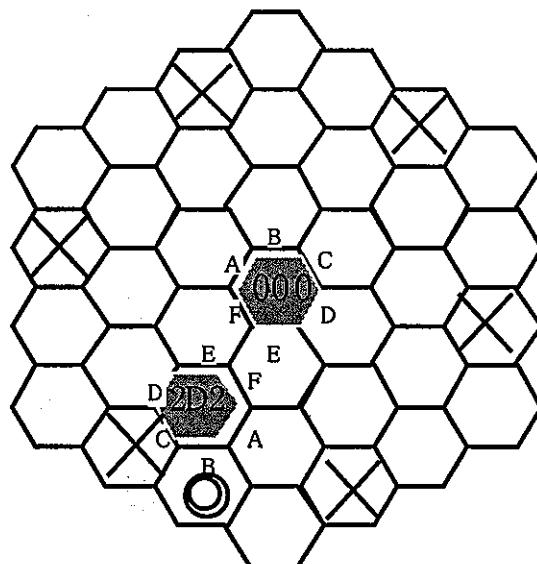


図3-2 炉内装荷位置図

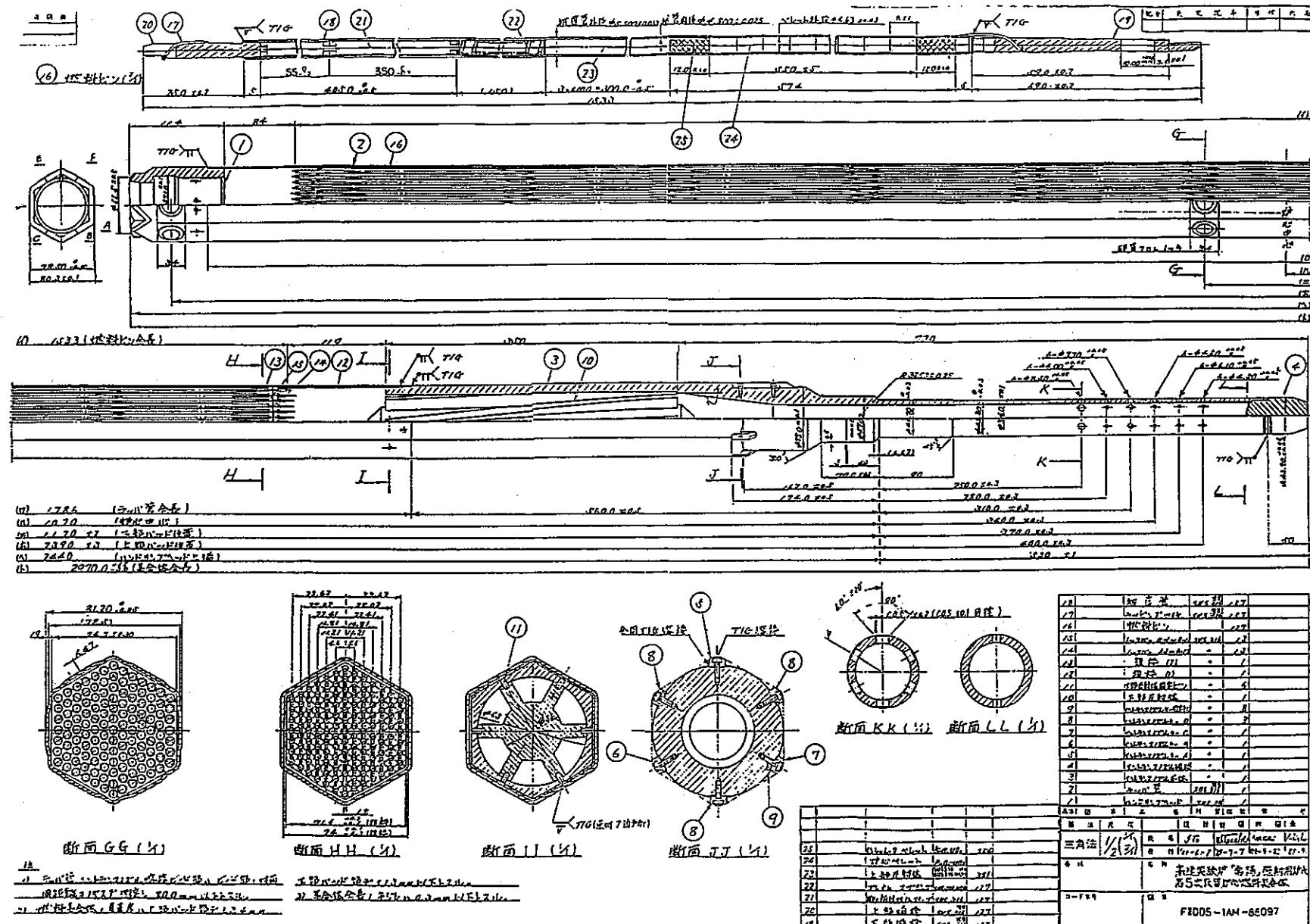
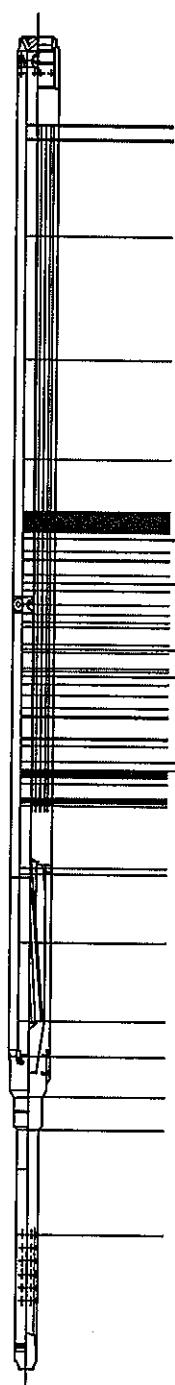


図 3-1 PFD 512 製造図面

3. 2 データの収集

今回のホット試験は初めて照射済炉心燃料集合体を対象に撮像する試験であり、ほぼ集合体全域をカバーするよう行った。



CT像は、標準スキャン(20分)と微細スキャン(40分)の2モードで104断面について撮像した。またスキャノグラムについても軸方向に3mmピッチでの集合体全域と主要構造部について0.3mmピッチで撮像した。撮像位置を図3-3に示す。

また装置の性能評価に必要なデータとして撮像状態での γ 線及びX線透過データを収集した。

○印は微細スキャン撮像位置（6断面）
その他は通常スキャン撮像位置（104断面）

図3-3 PFD 512 CT撮像位置

3.2.1 集合体の CT 像及びスキャノグラム像

(1) 主要構造物の撮像

標準スキャンで取得した CT 像と集合体全域のスキャノグラム像を図 3-4 に示す。取得した画像は全て鮮明であり、放射線による影響は無く、製造図面との比較によれば構造物の形状を正しく再現できているものと判断される。

炉心中心部におけるスキャンモードを比較した CT 像を図 3-5 に示す。両画像ともに直径 0.9mm のワイヤが識別でき、燃料ピン配列も整然としていることが確認された。

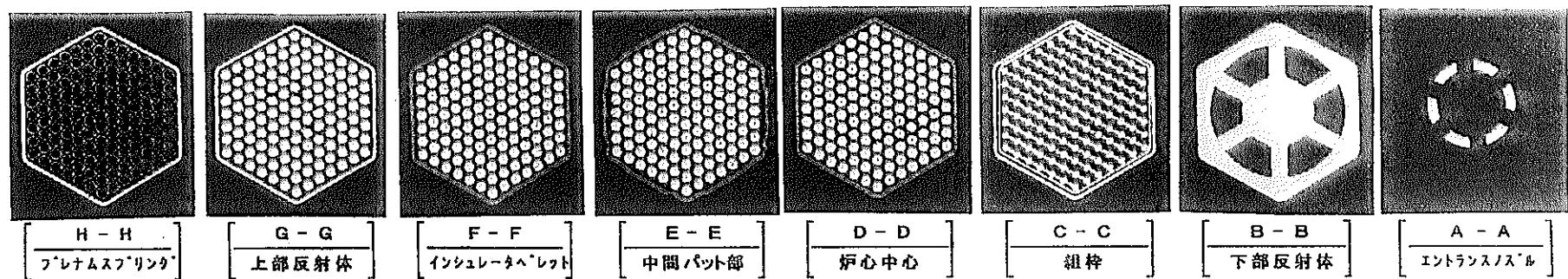
さらに微細スキャンは、スキャナの並進送り速度を 1/10 とし 10 個のデータを平均し 1 データとして取扱い画像を再構成したもので、収集データの計測誤差を減少させたことによりラッピングワイヤ等詳細部の認識性に優れた画像が得られることを確認した。

微細スキャンによる炉心燃料部の断層画像を図 3-6 に示す。炉心中心部では一部の燃料ペレットに明らかな中心空孔が観察されるとともにペレット周辺に亀裂が認められるが、炉心中心より上下 250mm の各位置では中心空孔は認められずランダムな方向に発生したペレット中心まで及ぶ亀裂が認められる。

燃料ピン上部端栓付近についてスキャンピッチの異なるスキャノグラム像を既設での X-RG とともに図 3-7 に示す。スキャンピッチ 0.3mm の画像は、燃料ピンの頂部が細かく表現されており、既設の X-RG と同等な画像性能を有することが確認された。

組枠部分のスキャノグラム像及び CT 像を図 3-8 に示す。E-F コーナからのスキャノグラム像では、組枠 1 とノックバーを押えている組枠 2 の接続部に段差が観察されたため CT 撮像を実施した。同様な状況は、PFD512 と同程度の燃焼度を有す PFD549, PFD538 の X 線ラジオグラフィーでも観察されている。CT 画像によると組枠 1 に対し、組枠 2 が時計方向にわずかに回転した状態で接続されており、特に E 面側の組枠 2 のラッパ管とのギャップは E-F コーナに比べ、E-D コーナが狭くなっていることが認められる。

CT像



スキャノグラム像

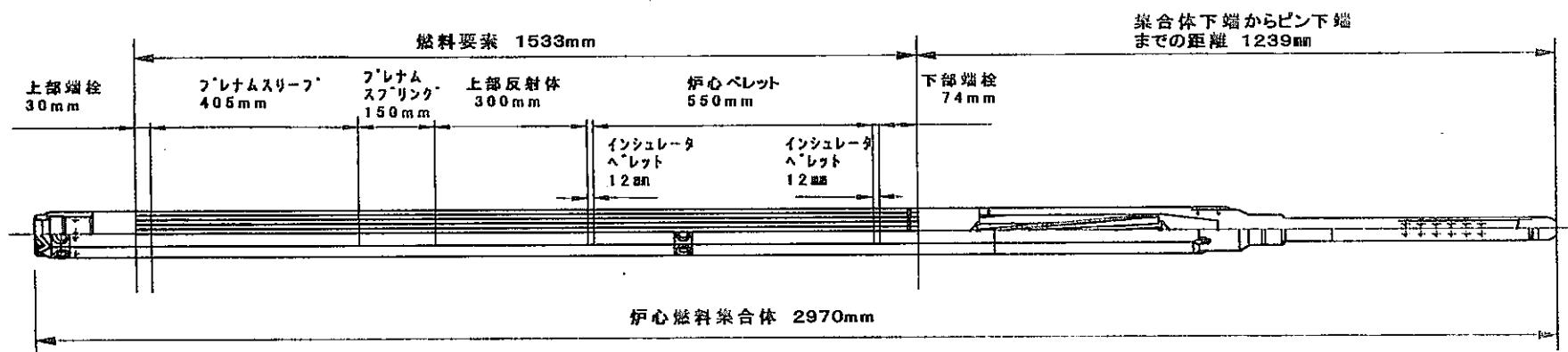
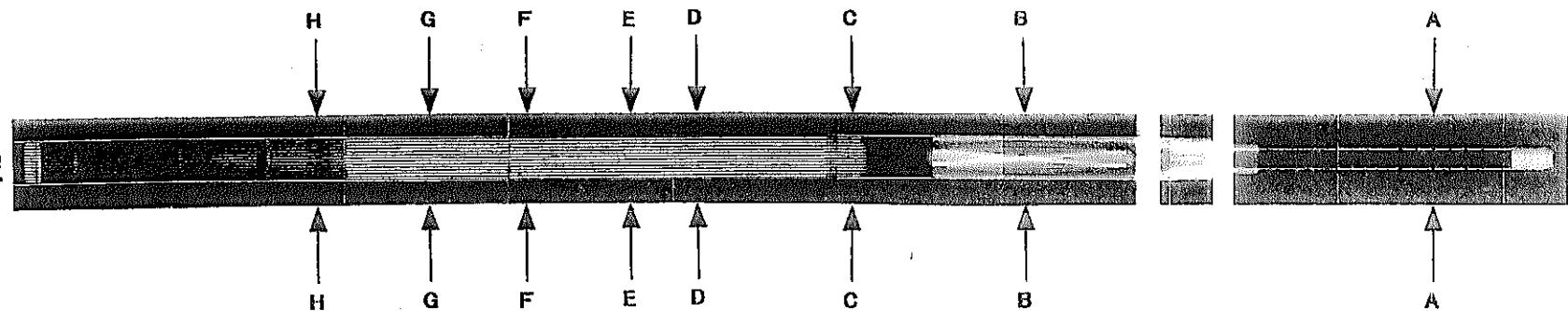


図3-4 「常陽」炉心燃料集合体のCT像及びスキャノグラム像

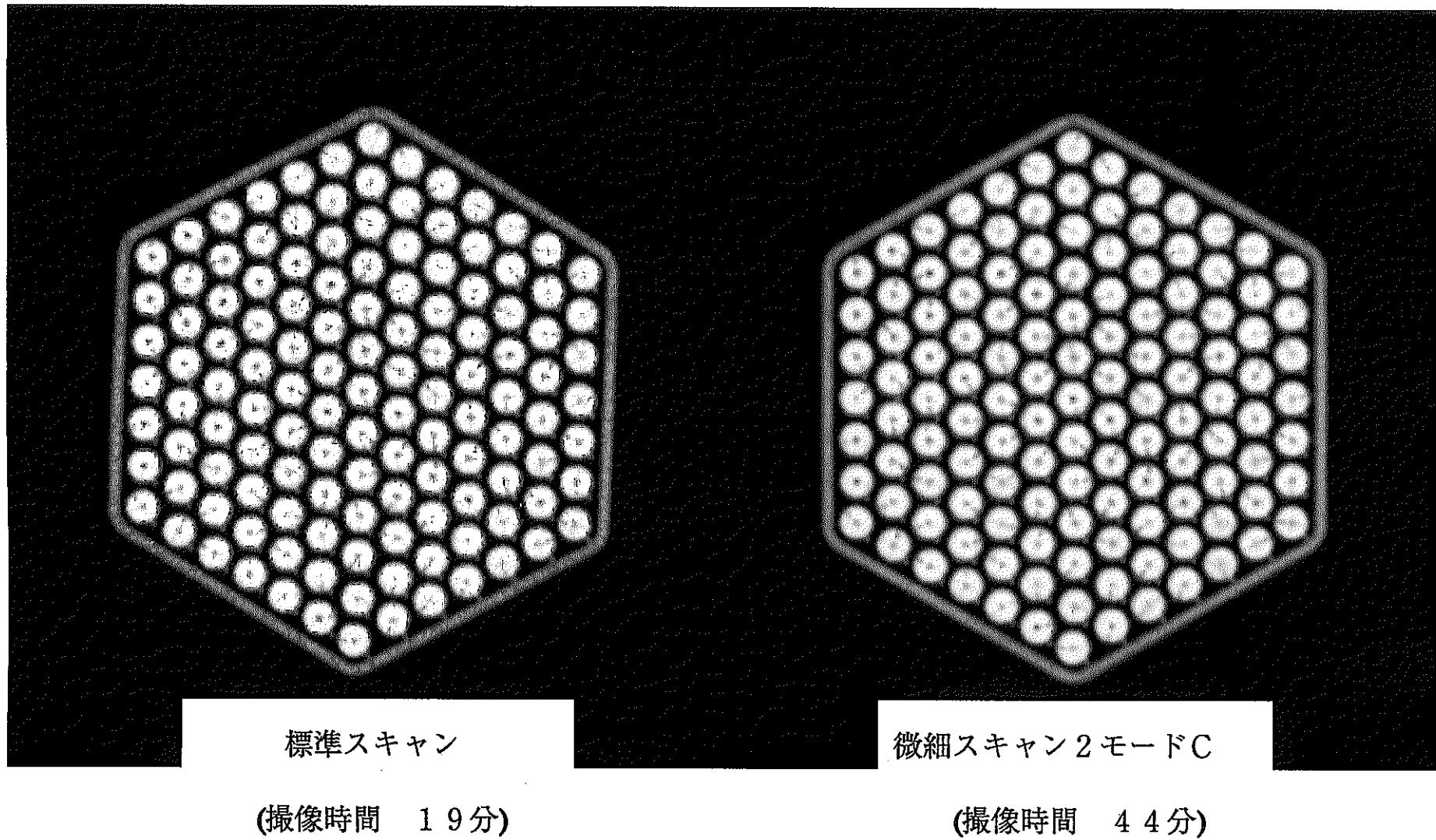


図3-5 炉中心部におけるスキャンモードの比較

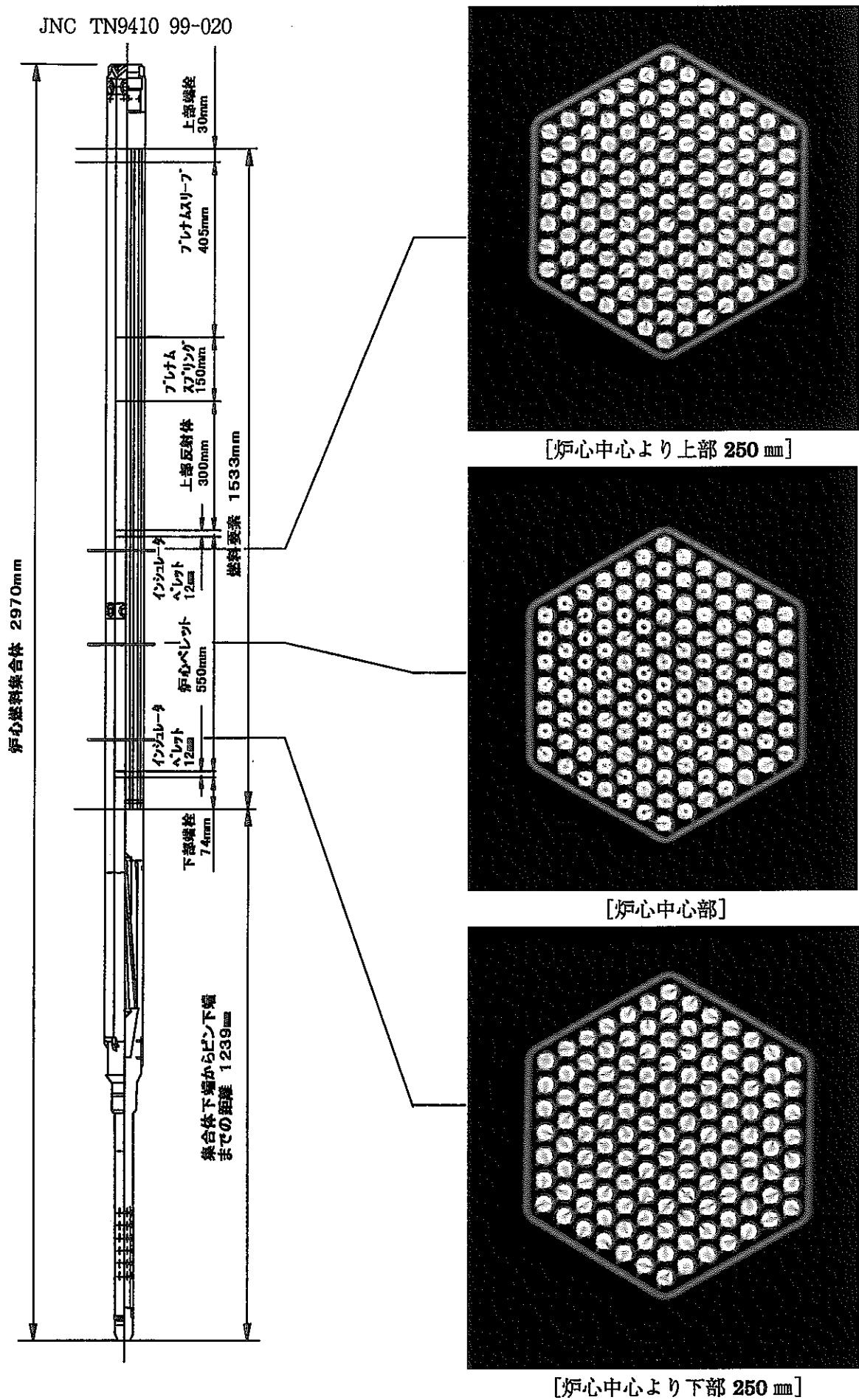
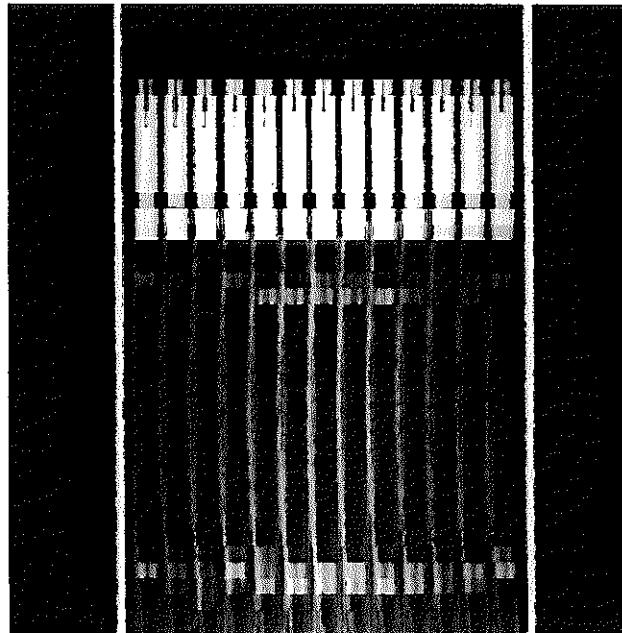


図 3-6 炉心燃料部（微細スキャン 2 モード C）

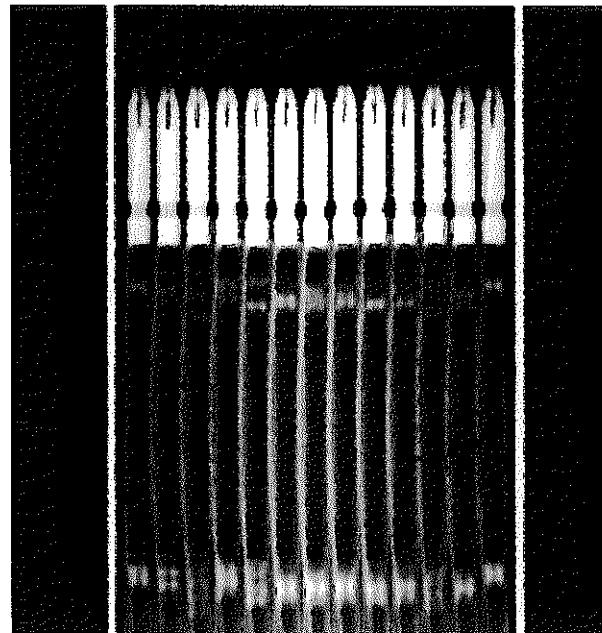


スキャノグラム像

(PFD 512)

スライスピッチ : 3 mm

撮像時間 : 21min

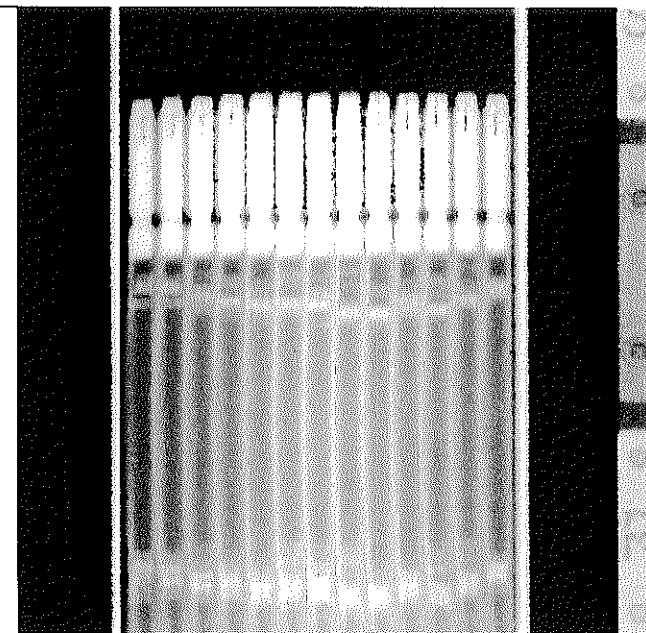


スキャノグラム像

(PFD 512)

スライスピッチ : 0.3mm

撮像時間 : 210min



X線 RG 像

(PFD 549)

撮像時間 : 20min

(現像時間含む)

図3-7 スキャノグラム-X線 RG 像比較図

(2) ピン頂部の連続CT撮像

ピン全長変化量の傾向を調査するためにピン上端について1mmピッチで連続CTを実施した。取得した画像をスキャノグラム像とともに図3-8に示す。スキャノグラム像ではピン全長変化は読み取れないが、集合体下端から2771mm位置のCT画像によればC,D,E両面に配置されたピン端栓が画像に現れており、これはピンが存在することを表していることから、わずかなピン全長の違いを明確に判断できることが確認された。

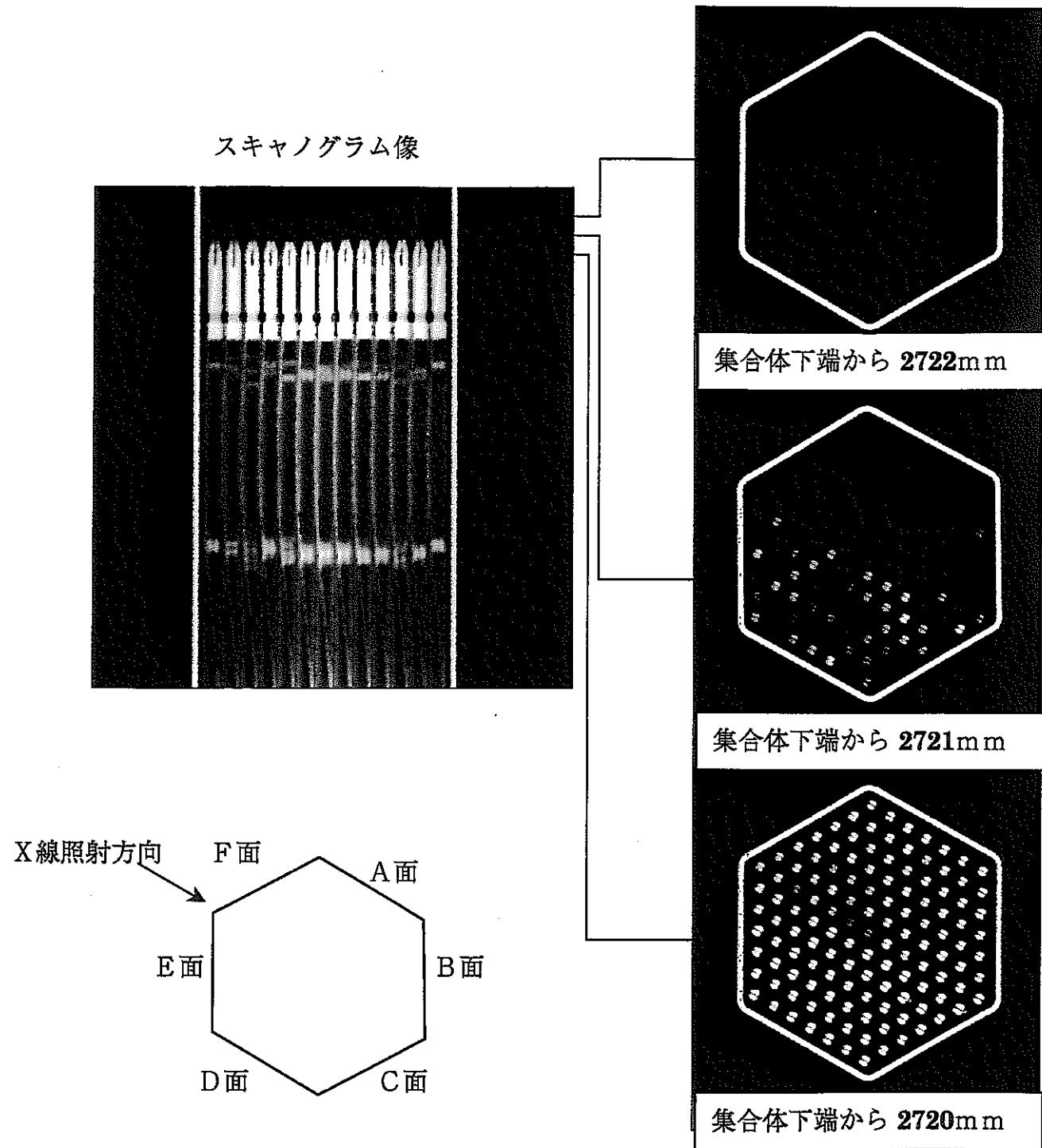


図3-8 燃料ピン頂部におけるスキャノグラム像と連続 CT 像

3.2.2 性能確認に必要なデータ収集

(1) γ 線の実測

集合体の撮像状態でのコリメータ前面及びX線検出器内の照射線量率と検出器出力値の実測結果を図3-9に示す。また測定状態を図3-10に示す。

コリメータ前面位置の照射線量率は、下部反射体と炉心燃料部にピークが認められ、下部反射体の部分が燃料部に比べわざかに高く、最大 2.86×10^{-1} C/kg/h であった。下部反射体の部分が炉心燃料部より高いのは、冷却期間が長く燃料部の短半減期核種の減衰及び燃料とステンレス鋼の自己吸収の差によるものが考えられる。また、下部反射体でも炉心燃料中心側で照射線量率が低いのは下部反射体がNa流動のため螺旋状になっていること、または熱中性子核反応による ^{60}Co が主な核種であることが原因と考えられる。

X線検出器箱内の最大照射線量率は、 7.74×10^{-4} C/kg/h でコリメータ前面での照射線量率分布を約 400mm 軸方向にシフトした分布であった。シフトの原因是、燃料集合体を遮蔽する遮蔽体の配置が関係しているものと考えられる。

検出器の出力値は、検出器システムのトリガ信号によって CT撮像と同じ(X線の発生はない)状態で並進させ、計算機に収集されるデジタルデータで得られる。測定データは、燃料集合体を装荷した状態で集合体の軸位置方向毎に並進させることによって CT用の検出器 30ch により 0.2° ピッチの 30 方向の並進データが同時に収集できる。

燃料集合体は並進範囲のほぼ中央に装荷される事から、1並進データは並進位置によって燃料集合体と無関係な空気層、燃料集合体部、空気層の部分についてデータが収集される。従って燃料集合体を除く両側の空気層部のデジタル値と γ 線ノイズが検出器に入射する燃料集合体部分のデジタル値を比較する事によって γ 線ノイズが把握できる。

検出器出力(30ch 平均値)の実測による γ 線の測定結果を表3-1に示す。

空気層部及び燃料集合体部の検出器出力値は集合体の軸方向位置に関係なくともに約 40 であり、標準偏差を考えると有意な γ 線は認められなかった。

表3-1 検出器出力による γ 線の測定結果

S/A 軸方向位置 デジタル値	空気層部 (A)	燃料集合体部 (B)	γ 線量 (B) - (A)	コリメータ前面での照射線量率 (C/kg/h)
1.2 (mm)	40.4 ± 4.0	40.4 ± 4.0	0.0 ± 5.7	1.55×10^{-2}
600 (mm)	40.6 ± 4.1	40.6 ± 4.2	0.0 ± 5.9	6.04×10^{-2}
1000 (mm)	40.3 ± 4.3	40.4 ± 3.8	0.1 ± 5.7	2.86×10^{-1}
1100 (mm)	40.9 ± 4.1	40.6 ± 4.2	-0.3 ± 5.9	2.32×10^{-1}
1200 (mm)	40.6 ± 3.9	40.5 ± 3.6	-0.1 ± 5.3	1.66×10^{-1}
1600 (mm)	40.4 ± 3.8	40.6 ± 4.1	0.2 ± 5.6	2.73×10^{-1}
2000 (mm)	40.4 ± 4.0	40.4 ± 4.3	0.0 ± 5.9	4.18×10^{-2}
2700 (mm)	40.5 ± 4.4	40.2 ± 4.0	-0.3 ± 5.9	3.10×10^{-3}

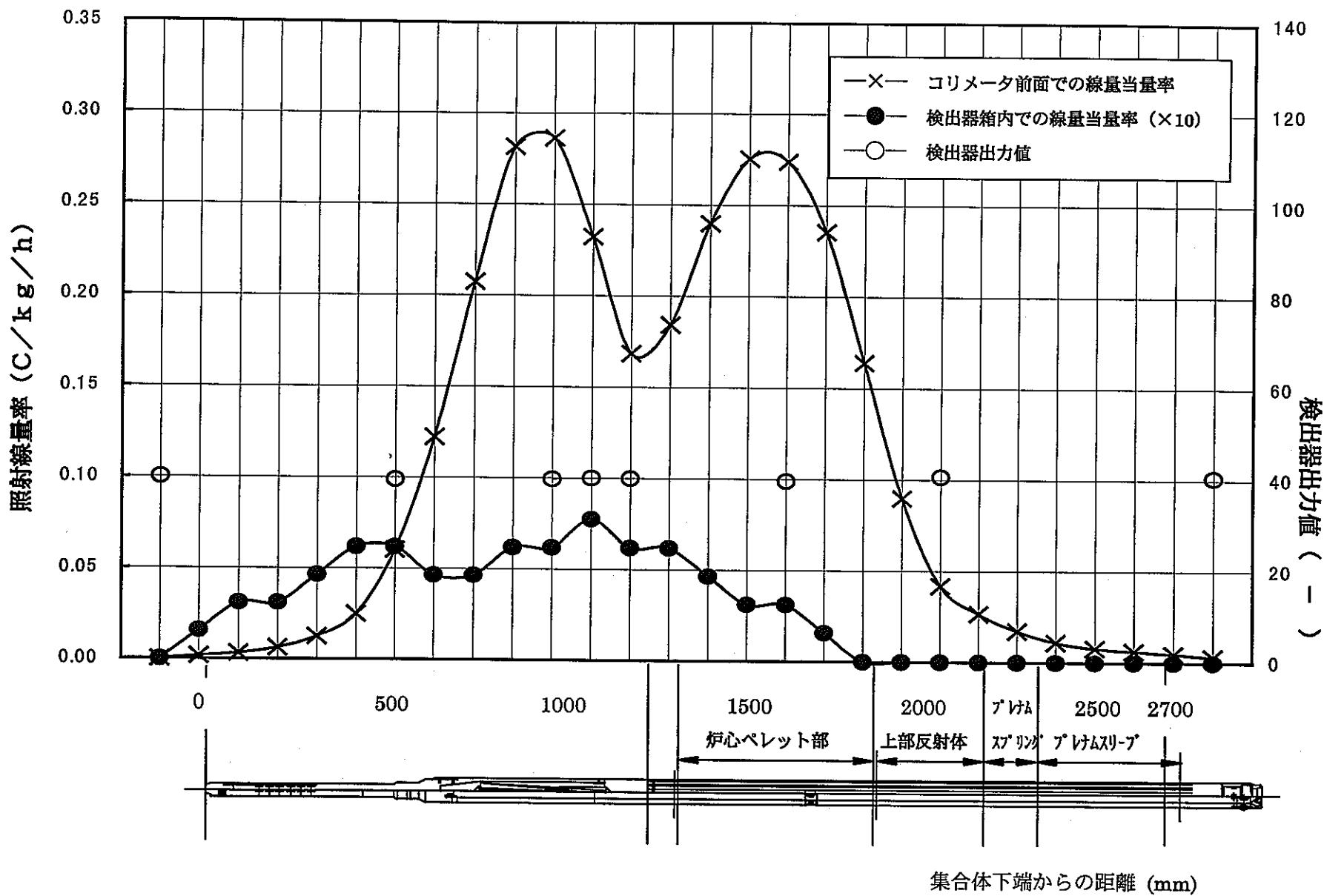


図 3-9 照射線量率及び検出器出力実測結果

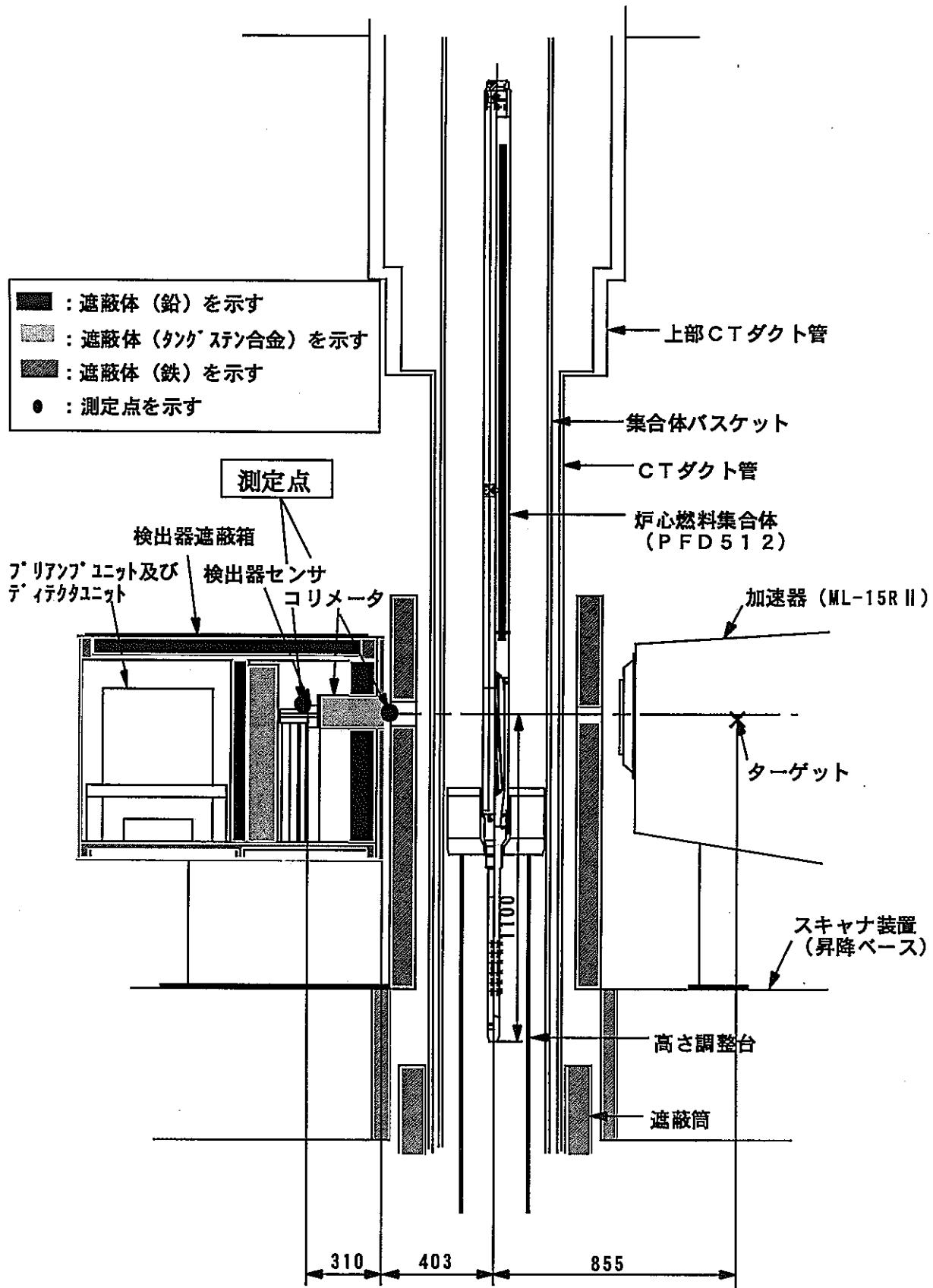


図 3-10 照射線量率測定状態図

(2) X線透過データ

γ 線ノイズの実測と同様にして、X線発生させて測定した燃料集合体の炉心中心部のX線透過データを図3-11に示す。横軸は並進位置、縦軸は透過X線強度を示しており、CT像はこのようなデータを900方向について収集し、計算機の再構成処理によって断層像を得ている。

各X線透過部の検出器出力値を表3-2に示す。

表3-2 各X線透過部のX線透過データ実測値

X線透过部	空気層	ダクト管(8 t)	集合体パ'スケット (10 t)	ラッパ管	燃料部 (最大減衰量部)
検出器出力値	57000	2470	1730	7220	1370

なお、本装置の暗電流(バックグラウンド)のデジタル値は約40であった。

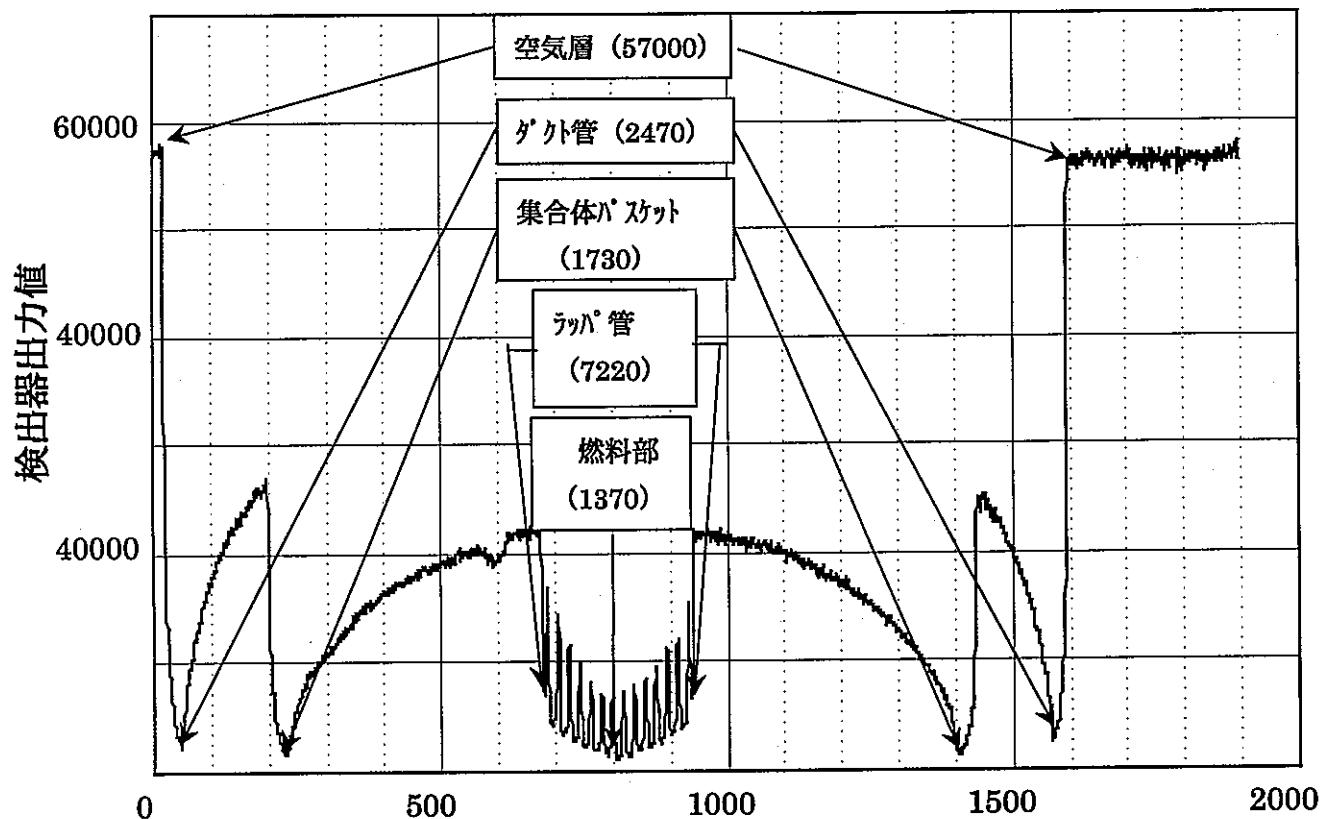


図3-11 X線透過データ

4. 性能評価

4.1 装置画像性能評価

4.1.1 測定系のノイズ評価

(1) 対象物物性データからの推定

入射X線光子計数の相対的誤差を評価するため、X線発生装置の実効エネルギーをステンレス鋼で製作されたダクト管（肉厚 8 mm ）と集合体バスケット（肉厚 10 mm ）を透過して得られた検出器出力と空気層を透過して得られた検出器出力から求める。

図4-1は集合体無装荷状態での1並進の検出器出力図である。

X線の吸収が少ない空気層

の検出器出力は最大を示し、

CTダクト管及び集合体バスケットの二重管を透過したX線検出器の出力は、X線の減衰分布を忠実に表している。

なお、データ数約600の位置での分布の乱れは集合体バスケットの溶接によるものであ

る。この分布から得られた空気層に

おける検出器出力値は61595、

二重管部最大減衰量部出力値は

25147であり、また、二重管最大透過厚

は3.6cmであるから、線吸収計数 μ は

$$\mu = \frac{-\ln\left(\frac{CT_B}{CT_D}\right)}{t} = \frac{-\ln\left(\frac{25147}{61595}\right)}{3.6} = 0.249 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

となる。さらに鉄の γ 線エネルギーと線吸収係数の関係図（図4-2）より、透過X線の実効エネルギーが約4MeVであることが求められる。

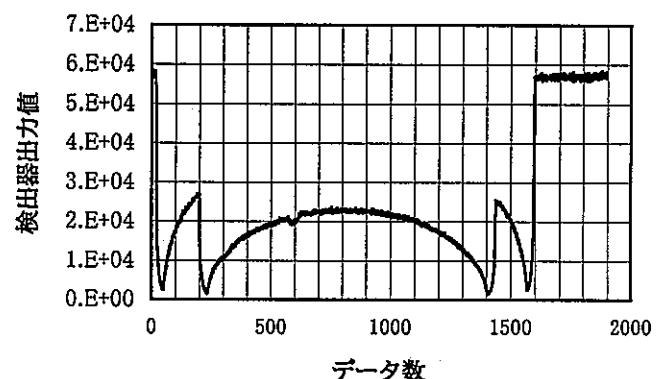


図4-1 集合体無装荷状態の検出器出力
(1並進データ)

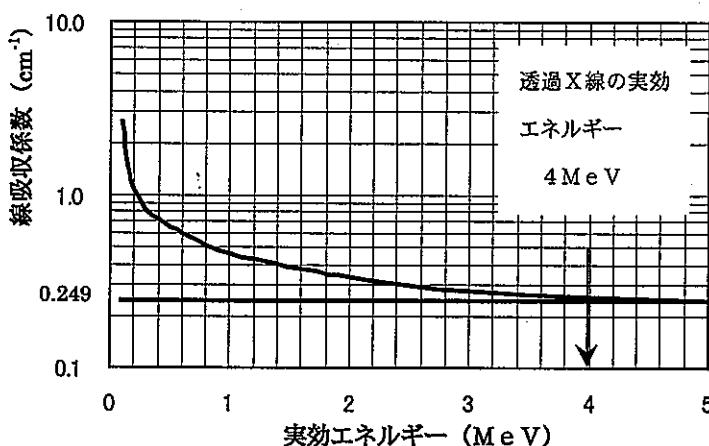


図4-2 γ 線エネルギーー線吸収係数関係図（鉄）

次に、X線発生装置の1パルス当たりの検出器に対する光子数 ϕ を以下の通り求める。

W	: 34 (eV) = 5.44×10^{-11} (erg) (空気のW値)
$\langle E \rangle$: 4 (MeV) = 6.4×10^{-6} (erg) (X線エネルギー)
μ_{en}	: 3.072×10^{-2} (cm^2/g) (空気の質量吸収係数)
ρ	: 1.293×10^{-3} (g/cm^3) (空気の密度)
e	: 4.8×10^{-10} (erg) (静電子の電荷)
X	: 2000 (R/min at 1m) $\times 0.71 \times (1.5\text{m})^{-2} / 60 = 10.5$ (R/s) (標準コリメータ装着時の照射線量当量率が 2000R/min-mに対し プレコリメータを装着している本 CT 装置は照射線量率が約 29%低 下する。)
Δs	: $0.03 \times 0.2 = 6.0 \times 10^{-3}$ (cm^2) (コリメータの開口断面積)
H	: 125 (PPS) (X線パルス周期)

なので、

$$\phi = \frac{5.44 \times 10^{-11}}{6.4 \times 10^{-6} \times 3.072 \times 10^{-2} \times 1.293 \times 10^{-3} \times 4.8 \times 10^{-10}} \times 10.5 \times 6.0 \times 10^{-3} \times \frac{1}{125} \\ = 2.25 \times 10^5$$

となる。

ここで、炉心燃料集合体による減衰 Att は以下の条件で計算する。
透過方向は最大減衰をうける対角管（ワイヤが重畳する方向）で計算を行い、空気（窒素）によるX線の吸収係数は無視する。（集合体内部）試料の吸収係数は以下の値を用いる。

MOXペレット	= ウラン (密度 : 9.4 g/cm^3)
	質量エネルギー吸収係数: $4.40 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$
SUS316相当	= 鉄 (密度 : 7.8 g/cm^3)
	質量エネルギー吸収係数: $3.30 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$

「常陽」炉心燃料集合体の鉄換算厚さ L_{Fe} は

$$L_{Fe} = 2.46 + \frac{4.14 \times 10^{-1} \times 5.85}{2.57 \times 10^{-1}} + \frac{\ln(16.1)}{2.57 \times 10^{-1}} = 13.7 \text{ (cm)}$$

となる。さらにダクト管及び集合体バスケットの厚さ 3.6cm を加え「常陽」炉心燃料集合体を撮影する場合の鉄換算厚さは、17.3cm となり最大減衰量 Att 「常陽」は

$$Att = \exp(-2.57 \times 10^{-1} \times 17.3) = 1.17 \times 10^{-2}$$

となる。

従って、この時の1パルス当たり検出器に入射するX線光子数は、

$$2.25 \times 10^5 \times 1.17 \times 10^{-2} = 2.63 \times 10^3 \text{ (photons/pulse)}$$

となる。

以上求めた空気層及び最大減衰量部における光子数から CT 撮影における測定系ノイズ評価に用いる入射X線光子数の相対的誤差 σ_d は

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{2.63 \times 10^3} + \frac{1}{2.25 \times 10^5}} = 1.96 \times 10^{-2}$$

となり測定系ノイズ 3σ は

$$3\sigma = \frac{0.71}{0.03 \times \sqrt{900}} \times 1.96 \times 10^{-2} \times 3 = 4.64 \times 10^{-2}$$

である。

(2) 実測による評価

「常陽」照射済燃料集合体の撮像状態における透過データから求めた γ 線を含む実測による σ_d は

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1370 + 0.2 + 40.4}{(1370 - 0.2 - 40.4)^2} + \frac{57000 + 40.4}{(57000 - 40.4)^2}} = 2.86 \times 10^{-2}$$

となり γ 線を含む実測による測定系ノイズ 3σ は

$$3\sigma = \frac{0.71}{0.03 \times \sqrt{900}} \times 2.86 \times 10^{-2} \times 3 = 6.77 \times 10^{-2}$$

であり、物性データからの求めたノイズと比べ、数値上は 50% 程度に大きい。なおノイズ σ を用いた画像性能評価については、4.1.2 項に示す。

(3) γ 線による影響

γ 線測定において、装置概念設計の通り有意な測定値が得られなかった。

4.1.2 装置の画像性能

(1) MTF 曲線による二点間寸法測定精度

測定系のノイズ評価結果を基に通常スキャンにおける MTF 曲線による二点間寸法測定精度を評価すると、対象物物性データからの推定値は±0.31mm、実測評価値では±0.33mm であり計算結果とほぼ一致することが確認できた。

(2) CDD 曲線による密度識別能

二点間寸法測定精度と同様に測定系のノイズ評価に基づく CDD 曲線による密度識別能と二点間寸法測定精度をまとめて表 4-1 に示す。

表 4-1 照射後試験用 X 線 CT 装置の画像性能
(「常陽」炉心燃料集合体撮影の場合)

		物性データによる評価	実測評価		
* 密度識別能	金属ナトリウム (0.98 g/cm^3)	9.20	mm^ϕ	13.58	mm^ϕ
	ステンレス (7.8 g/cm^3)	0.26	mm^ϕ	0.31	mm^ϕ
	MOX 燃料 (9.4 g/cm^3)	0.23	mm^ϕ	0.26	mm^ϕ
	二点間寸法測定精度	±0.31	mm	±0.33	mm

* 定義：空気（密度）中から対象とする物質を識別するのに必要な最小直径 (mm^ϕ)

4.1.3 γ 線の影響評価

X 線検出器による γ 線の実測結果及び取得画像から PFD512 燃料集合体の γ 線の影響は認められなかった。また、コリメータの開孔スリット以外からの入射 γ 線の影響を燃料確認するため参考として集合体の有無の状態での X 線透過並進データの比較図を図 4-3 に示す。

これらの実測結果から今回の線源レベルでは、 γ 線の画像への影響は無いと判断される。

一方、今回の PFD512 集合体の線源強度は ORIGEN2 による炉心中央部 1mm 当たり $1.5 \times 10^{12} \text{ Ph/sec}$ (軸方向ピーキングを考慮) であり、もんじゅ燃料で想定される $1.5 \times 10^{13} \text{ Ph/sec}$ の 1/10 である。従って、より強い γ 線強度の影響について確認して行く必要がある。

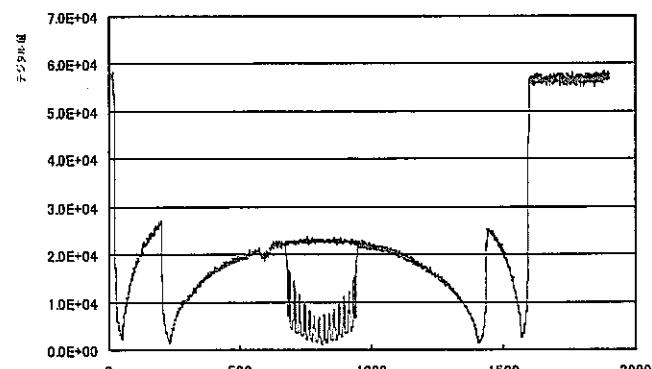


図 4-3 X 線透過データ比較図

4. 2 照射後試験機能の評価

4.2.1 集合体内部状況の観察機能

(1) 異物混入の有無

集合体内部への異物混入は、今回の PFD512 集合体では観察されなかったが、従来の X-RG による透過写真と同様機能であるスキャノグラム像に加え断面像が得られることから、異物が認められた場合、その存在位置、形状が特定でき、さらに画素の濃淡である CT 値は物質の密度を表わすことから物質の推定が可能となるものと考えられる。

(2) 支持構造物の変形、配置・配列の乱れ観察

内部状況の観察では、組枠部、燃料ピン頂部の観察の結果、X 線透過像だけでは判断不可能な内部状況を断層画像によって明確に観察できることが確認された。CT 像を軸方向に繋ぎあわせ任意の位置を任意の角度・方向から観察できる 3 次元表示が加えれば内部状況の観察性はさらに向上するものと考えられる。

(3) BDI (Bundle Duct Interaction) 挙動

PFD512 集合体の燃料ピン配列は、全体的に整然としていることが確認され、未使用とほぼ同じ状況にあると推定される。しかし F-A コーナピンである No. 1 ピンに着目するとラッパ管側に配置されているのが観察される。CT 像上で A 面ラッパ管との隙間寸法を測定した結果を図 4-4 に示す。ラッピングワイヤが A 面を向く軸位置では 0.8mm 以上の隙間があるがその中間位置（ワイヤが D 面方向）では、0.4mm 程度に狭くなっている。これはラッパ管を外すとバンドルがビア樽状に膨らむ残留湾曲による燃料ピンの曲がり⁵⁾によるものと考えられた。

なお本集合体の BDI 量(dw) は以下の式より 0.3dw と推定され、炉外バンドル試験の評価によれば、ピンとラッパ管が接触する 1dw を超えておらず BDI 上問題とならないレベルである。⁶⁾

$$\text{BDI 量 (dw)} = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{E}}{\mathbf{dw}}$$

B : ピン、ワイヤが正規配列している状態のピン束寸法
(84.3 mm^{*1})

E : ダクト内対面距離 (84.0 mm^{*2})

dw : ワイヤ径 (0.9 mm^{*1})

*1 : PFD512 と同様な燃焼度を持つ集合体のピン外形寸法（実測数値）、ワイヤ寸法（設計数値）より推定算出

*2 : ダクト内対面距離 = ((集合体対角間寸法平均値(実測数値)) × cos30°)
-(ラッパ管厚さ (設計数値))

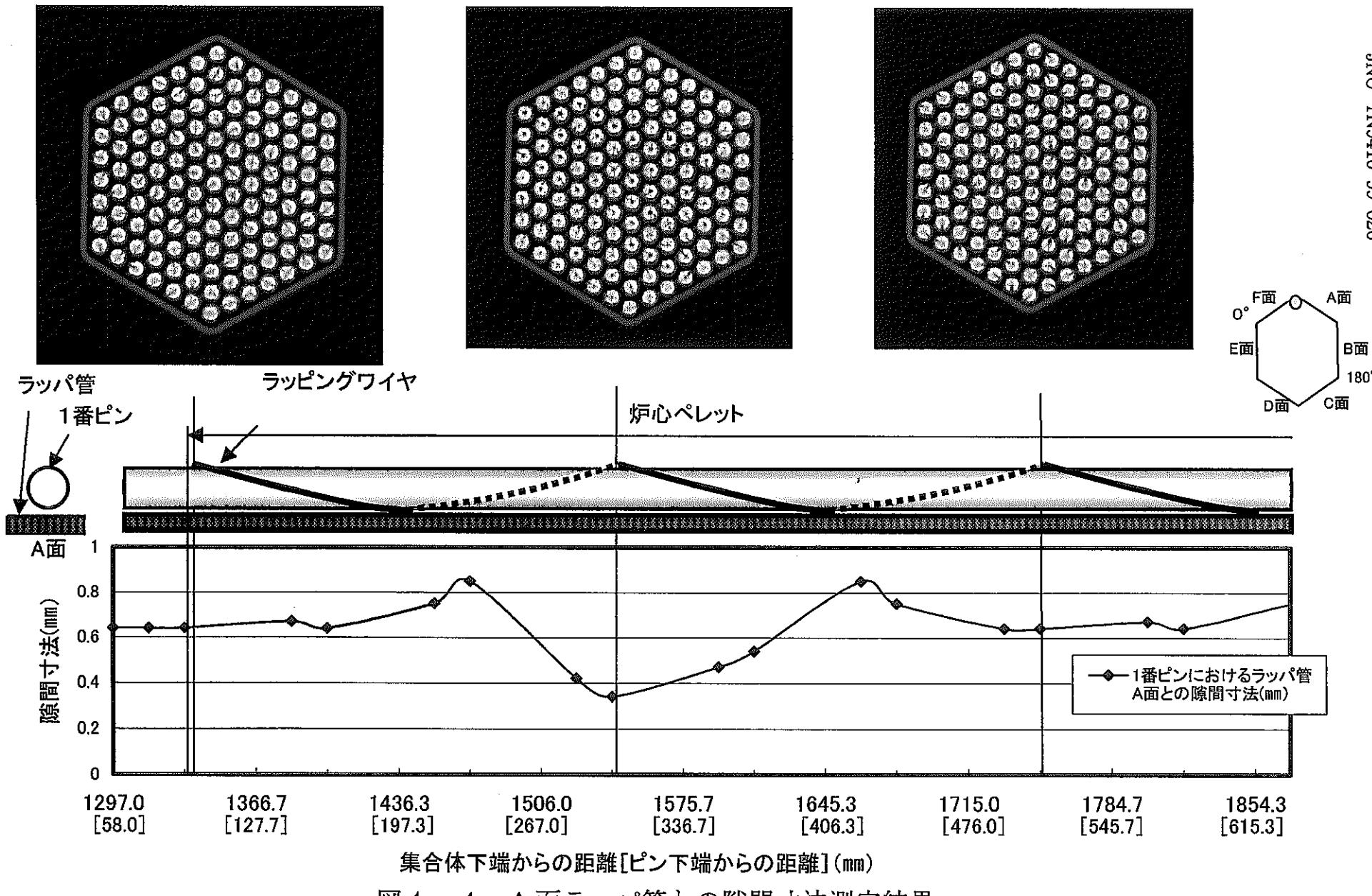


図 4-4 A 面ラッパ管との隙間寸法測定結果

4.2.2 燃料ピンの内部状況の観察機能

PFD512 集合体内部状況（燃料ピンの配列図）を図 4-5 に示す。

燃料ペレットの中心空孔、大きな亀裂の発生分布及びワイヤのズレ等が観察でき、集合体内の燃料ピン全体の状況を短時間に把握することが可能となった。

中心空孔を模擬した鉛ペレットを装填した模擬燃料集合体の CT 像と CT 値の分布の関係と今回の結果を図 4-6 にまとめて示す。画像上明らかに中心空孔（燃料ピン中央部の黒点）が生成していると推定される炉心中心部ピンの CT 値の分布は 0.5 の模擬中心空孔の模擬ペレットとの分布と一致している。また、炉心上部の集合体周辺部等の燃料ピン中央部の黒点が明確に識別できないピンについても同様に比較すると 0.3 の模擬中心空孔の模擬ペレットとの分布と極めて良く一致していることが解る。従って画像上燃料ピン中央部の黒点が明確に確認できない部位についても、CT 値から判断すると中心空孔の生成が推定できる。

なお、PFD512 の各燃料ピン毎の照射情報は図 4-7 に示すとおり、炉心中心における燃焼度は、70,580MWd/t(58 ピン) 64,300 MWd/t(70 ピン)、線出力は、359W/cm 345W/cm でありいずれも線出力が 300W/cm を超えている。MK-II 炉心燃料では照射初期の線出力が 300W/cm 程度を超えると中心空孔が生成が観察され始めていることからも⁵⁾、中心空孔が生成しているものと推定される。

中心空孔は、燃料ペレットの製造条件や照射条件（本集合体は、制御棒隣接位置（C 面）から炉心中心にシャフリングされている）に影響されるため中心空孔生成分布と照射条件等との関係を明らかにすることが望まれる。

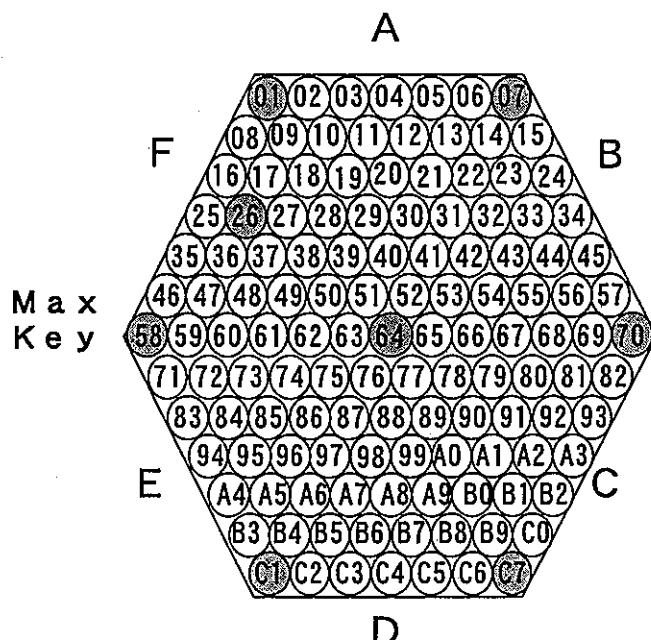
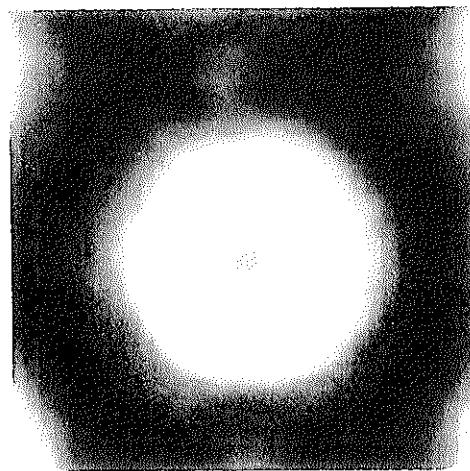
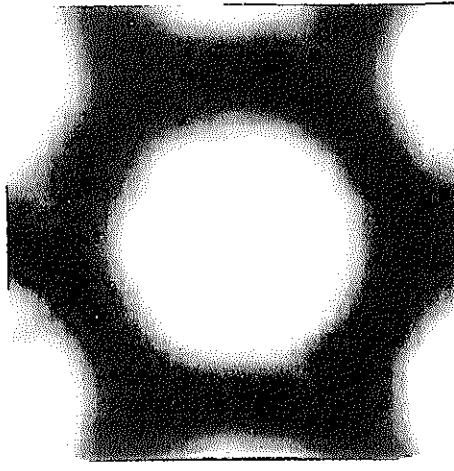
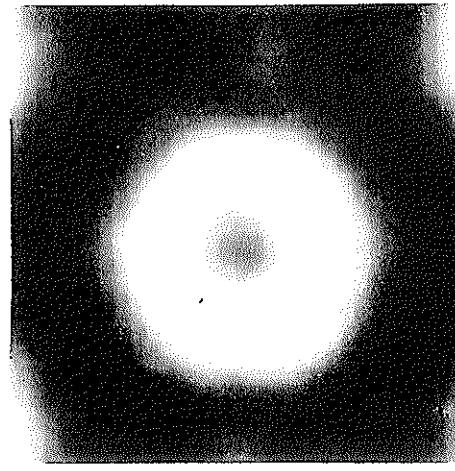
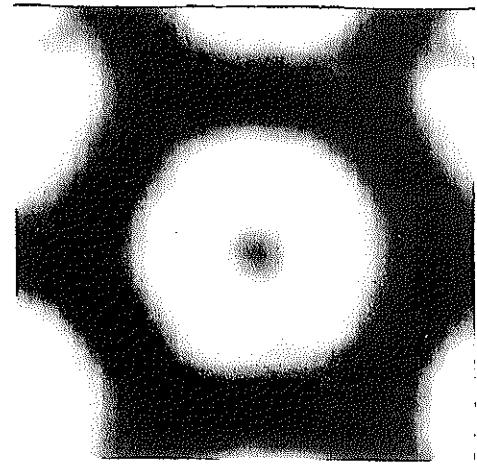


図 4-5 集合体内燃料ピンの配列図

もんじゅ模擬欠陥 $\phi 0.3\text{mm}$ 

常陽 No.26ピン

もんじゅ模擬欠陥 $\phi 0.5\text{mm}$ 

常陽 No.64ピン

-47-

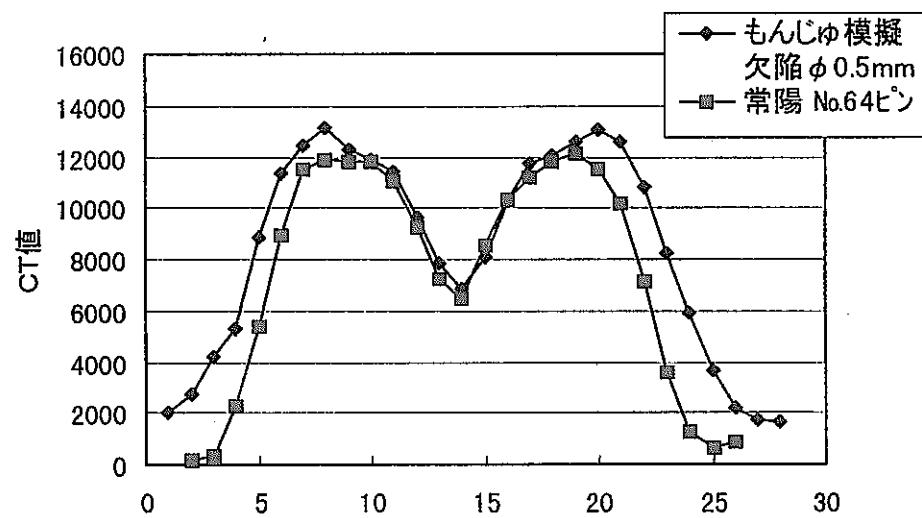
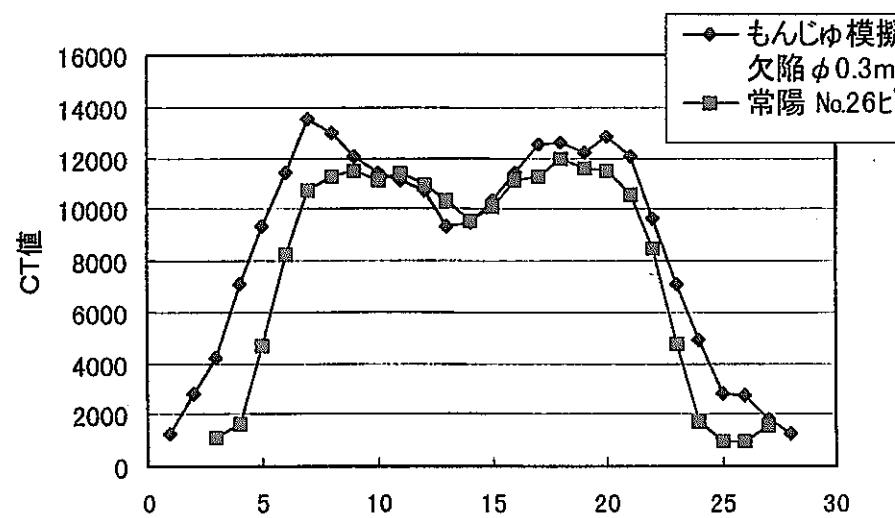


図4-6 模擬欠陥と実燃料とのCT値比較

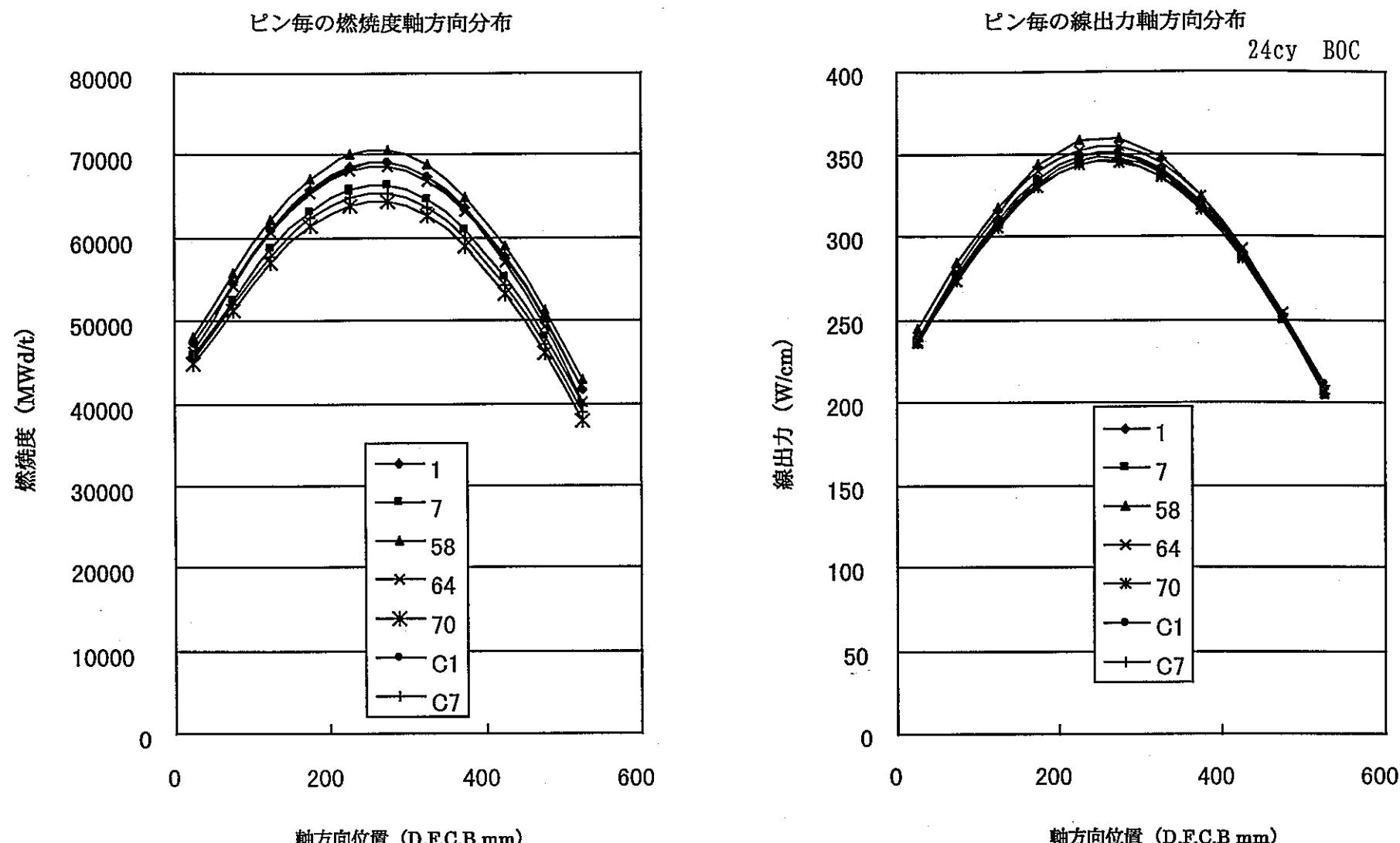


図4-7 各燃料ピン毎の照射情報

5. おわりに

照射後試験用 X 線 CT 装置は、照射後試験技術の拡充を目的として世界で初めて照射後試験施設に導入し、「常陽」照射済炉心燃料集合体の撮像成功によって開発の目的を達成したことを確認した。「常陽」燃料集合体撮像試験によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 集合体平均燃焼度 58,600Mwd/t の PFD512 集合体の CT 像及びスキャノグラム像とも集合体からの γ 線による影響はなく全て鮮明な像が得られた。
- (2) 通常スキャンモードで撮影する場合の画像性能を ASTM で規定されている手法にて評価すると「常陽」炉心燃料集合体の撮像では、画像上の二点間寸法測定精度 $\pm 0.33\text{mm}$ となることが確認された。
- (3) PFD512 集合体の燃料ピン配列は、一部のコーナピンを除き全体的に整然としていることが確認され、未使用とほぼ同じ状況にあると判断され、集合体内部状況を観察できることを確認した。
- (4) 炉心中心部の燃料ペレットには中心空孔が観察され、集合体内の燃料ピン全体の中心空孔生成挙動を短時間に把握することが可能となった。なお、これまでの模擬ペレットの CT 撮像結果との比較から、画像上中心空孔が識別出来ない部分についても中心空孔の生成が推測できる。

FMF 増設施設に設置した X 線 CT 装置による「常陽」照射済燃料集合体の撮像の結果、放射線の影響を受けることなく鮮明な断層画像を短時間に取得できることを確認した。今後は、さらに強い放射能を有する集合体の撮影や CT 像の 3 次元表示化、CT 像と実際の断面との関係調査、画像解析システムの改良等を進め高性能燃料の開発に反映していく必要がある。

6. 謝辞

照射後試験用 X 線 CT 装置の開発にあたって装置の運転維持管理業務、試験データの整理等多大な御協力を頂いた検査開発株式会社の久保宏明氏、照沼謙一氏、三澤進氏に感謝致します。

また、画像性能評価手法について指導、助言を頂いた株式会社日立製作所の佐藤克利氏及び照射後試験計画具体化のため貴重な助言を頂いた照射施設運転管理センターの関係者をはじめとする多くの皆様に深く感謝致します。

7. 参考文献

- 1) 永峯剛, 鯉淵浩人, 金井和樹, 中村保雄, 岩永繁 : FMF 増設施設X線 CT 検査装置の開発
—基本設計—, PNC ZN9410 92-355 (1992)
- 2) ASTM E1441 Standard Guide For Computed Tomography (CT) Image (1995)
- 3) 内田勝 : 放射線画像工学、オーム、pp.137~164 (1986)
- 4) 岡崎哲治, 永峯剛, 中村保雄 : 燃料ピン束変形測定用 X 線 C T 装置の開発、
動燃技報、No16, pp.93~98 (1996)
- 5) 鹿倉栄, 丸山忠司, 佐藤義則, 浅賀建男, 鶴銅重治, 吟野一郎 : 「常陽」 MK-炉心燃料の
照射挙動、動燃技報、No.86, pp.26~33 (1993)
- 6) 田中康介, 内海貴志, 岡崎哲治, 永峯剛, 中村保雄, 浅賀建男 : 炉外圧縮試験による高速炉
燃料ピン束挙動評価、(社) 日本原子力学会「1997 年秋の大会」予稿集第Ⅱ分冊、p909

付 錄- 1

(1) MTF計算式

(2) MTF計算結果

(1) MTF 計算式

MTF 計算式(式 3.1)自体は ASTM で規格化されているのでここでは、式を分解し解説する。

$$MTF(f) = \frac{F_{con}(f)}{f} \times F_{BW}(f) \times F_{MOV}(f) \times F_{INT}(f) \times F_{PIX}(f) \quad (式 3.1)$$

上式において $\frac{F_{con}(f)}{f}$ はフィルタ関数を意味し、FMF 増設施設に設置している X 線 CT 装置は、画像処理用デジタルフィルタ関数として Shepp-Logan 型フィルタを適用している。このフィルタ関数の特徴は高周波特性を落とすことにより S/N 比を向上させるもので、ASTM では、このフィルタ関数を式 3.2 で表している。

$$\frac{F_{con}(f)}{f} = \frac{\sin(\pi fs)}{\pi fs} \quad (式 3.2)$$

$\frac{F_{con}(f)}{f}$: フィルタ関数

f : 空間周波数 (Hz)

s : サンプリング間隔 (mm)

$F_{BW}(f)$ は X 線の広がりに対する幾何学的不銳(半影と呼ばれるボケ)を表しており、以下の式で示される。

$$F_{BW}(f) = \frac{\sin\left(\frac{\pi fd}{M}\right)}{\frac{\pi fd}{M}} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi fa(M-1)}{M}\right)}{\frac{\pi fa(M-1)}{M}} \quad (式 3.3)$$

ここで M は $M = L/q$ とする。この定数は装置幾何学的配置を示しており、不变である。

L : 線源-検出器間距離 (mm)

q : 線源-検査対象物(中心)間距離 (mm)

d : 検出器サイズ (mm)

a : 線源焦点サイズ (mm)

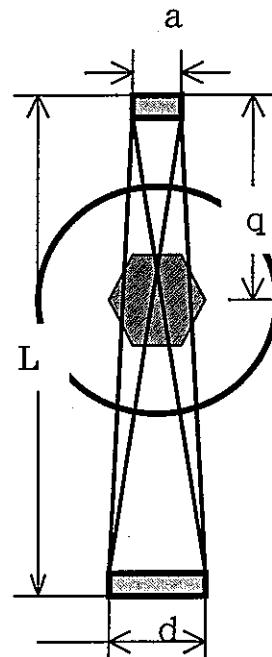


図 3-8 X 線源検出器配置図

被検体に対して、スキャナ装置動作(X線源移動)による画像のボケ(運動ボケ)が発生する。この運動ボケは特に微細な構造(境界部等)を消去してしまう。この運動ボケは以下の式で表せる。

$$F_{\text{mov}}(f) = \frac{\sin(\pi\omega vt)}{\pi\omega vt} = \frac{\sin(\pi fs)}{\pi fs} \quad (\text{式 3.4})$$

$F_{\text{MOV}}(f)$: 運動ボケの MTF

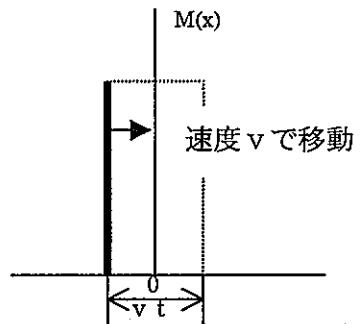


図 3-9 運動ボケのモデル

データを画像上に表示させる場合、データとデータの間が空白となり画像構成上好ましくない。そこで、式 3.5 を用いてデータのない領域の補間を行う。例を右図に示す。本 X 線 CT 装置は 1 次元線形補間を行っているので評価する場合、以下の式を用いればよい。

$$F_{\text{INT}}(f) = \frac{\sin^2(\pi fs)}{(\pi fs)^2} \quad (\text{式 3.5})$$

$F_{\text{INT}}(f)$: 一次元線形補間

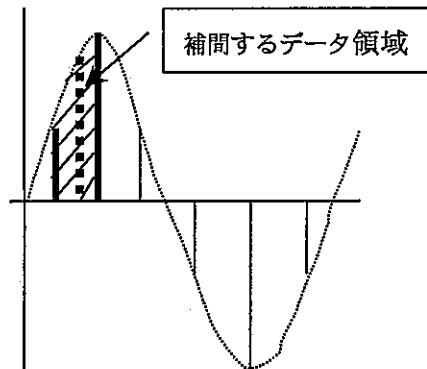


図 3-10 データ補間概念図

最後のパラメータである $F_{\text{pix}}(f)$ の概念は、X 線源から発生された X 線の光量分布 $\delta(x)$ は、幅の狭いスリットを通過し検出器(画面上)に入射すると画面上の光量分布は $\delta(x)$ ではなく、ある幅を持った $h(x)$ となる。概念図を図 3-11 に示す。

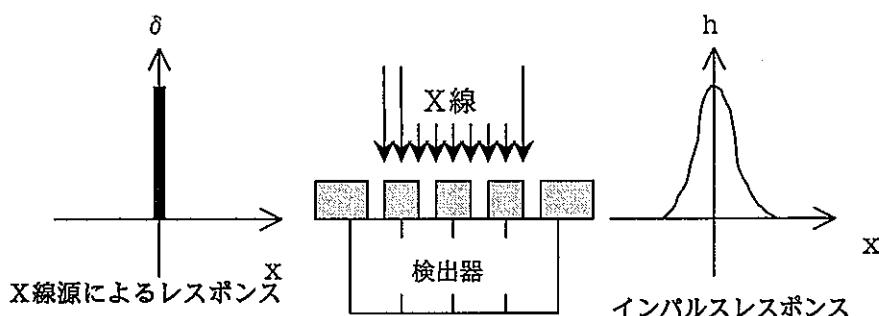


図 3-11 画面表示上のボケ概念図

$$F_{\text{pix}}(f) = \frac{\sin(\pi f \Delta p)}{\pi f \Delta p} \quad (\text{式 3.6})$$

Δp : 画素サイズ

(2) MTF 計算結果

f	F con(f)/F	F mov(F)	F int(F)	F pix(F)	F bw(F)	MTF(f)	分解能	空間分解能
0.010	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	9.999E-01	50.0000	9.999E+01
0.020	9.999E-01	9.999E-01	9.999E-01	9.999E-01	9.999E-01	9.996E-01	25.0000	9.996E+01
0.030	9.999E-01	9.999E-01	9.997E-01	9.999E-01	9.997E-01	9.991E-01	16.6667	9.991E+01
0.040	9.998E-01	9.998E-01	9.995E-01	9.998E-01	9.995E-01	9.983E-01	12.5000	9.983E+01
0.050	9.996E-01	9.996E-01	9.993E-01	9.996E-01	9.992E-01	9.974E-01	10.0000	9.974E+01
0.060	9.995E-01	9.995E-01	9.989E-01	9.995E-01	9.989E-01	9.962E-01	8.3333	9.962E+01
0.070	9.993E-01	9.993E-01	9.986E-01	9.993E-01	9.985E-01	9.949E-01	7.1429	9.949E+01
0.080	9.991E-01	9.991E-01	9.981E-01	9.991E-01	9.980E-01	9.933E-01	6.2500	9.933E+01
0.090	9.988E-01	9.988E-01	9.976E-01	9.988E-01	9.975E-01	9.915E-01	5.5556	9.915E+01
0.100	9.985E-01	9.985E-01	9.970E-01	9.985E-01	9.969E-01	9.896E-01	5.0000	9.896E+01
0.200	9.941E-01	9.941E-01	9.882E-01	9.941E-01	9.877E-01	9.589E-01	2.5000	9.589E+01
0.300	9.867E-01	9.867E-01	9.736E-01	9.867E-01	9.726E-01	9.097E-01	1.6667	9.097E+01
0.400	9.765E-01	9.765E-01	9.535E-01	9.765E-01	9.516E-01	8.448E-01	1.2500	8.448E+01
0.500	9.634E-01	9.634E-01	9.281E-01	9.634E-01	9.251E-01	7.677E-01	1.0000	7.677E+01
0.600	9.475E-01	9.475E-01	8.979E-01	9.475E-01	8.934E-01	6.824E-01	0.8333	6.824E+01
0.700	9.290E-01	9.290E-01	8.631E-01	9.290E-01	8.569E-01	5.930E-01	0.7143	5.930E+01
0.800	9.079E-01	9.079E-01	8.243E-01	9.079E-01	8.160E-01	5.034E-01	0.6250	5.034E+01
0.900	8.843E-01	8.843E-01	7.820E-01	8.843E-01	7.714E-01	4.172E-01	0.5556	4.172E+01
1.000	8.584E-01	8.584E-01	7.368E-01	8.584E-01	7.235E-01	3.372E-01	0.5000	3.372E+01
1.100	8.303E-01	8.303E-01	6.893E-01	8.303E-01	6.729E-01	2.654E-01	0.4545	2.654E+01
1.200	8.000E-01	8.000E-01	6.401E-01	8.000E-01	6.201E-01	2.033E-01	0.4167	2.033E+01
1.300	7.679E-01	7.679E-01	5.897E-01	7.679E-01	5.660E-01	1.511E-01	0.3846	1.511E+01
1.400	7.341E-01	7.341E-01	5.389E-01	7.341E-01	5.109E-01	1.089E-01	0.3571	1.089E+01
1.500	6.986E-01	6.986E-01	4.881E-01	6.986E-01	4.556E-01	7.583E-02	0.3333	7.583E+00
1.600	6.618E-01	6.618E-01	4.380E-01	6.618E-01	4.006E-01	5.087E-02	0.3125	5.087E+00
1.700	6.238E-01	6.238E-01	3.892E-01	6.238E-01	3.466E-01	3.274E-02	0.2941	3.274E+00
1.800	5.848E-01	5.848E-01	3.420E-01	5.848E-01	2.940E-01	2.011E-02	0.2778	2.011E+00
1.900	5.450E-01	5.450E-01	2.970E-01	5.450E-01	2.433E-01	1.170E-02	0.2632	1.170E+00
2.000	5.046E-01	5.046E-01	2.546E-01	5.046E-01	1.950E-01	6.378E-03	0.2500	6.378E-01
2.100	4.637E-01	4.637E-01	2.150E-01	4.637E-01	1.496E-01	3.206E-03	0.2381	3.206E-01
2.200	4.226E-01	4.226E-01	1.786E-01	4.226E-01	1.072E-01	1.446E-03	0.2273	1.446E-01
2.300	3.815E-01	3.815E-01	1.456E-01	3.815E-01	6.831E-02	5.524E-04	0.2174	5.524E-02
2.400	3.406E-01	3.406E-01	1.160E-01	3.406E-01	3.301E-02	1.514E-04	0.2083	1.514E-02
2.500	3.001E-01	3.001E-01	9.006E-02	3.001E-01	1.502E-03	3.657E-06	0.2000	3.657E-04
2.510	2.961E-01	2.961E-01	8.766E-02	2.961E-01	-1.437E-03	-3.269E-06	0.1992	-3.269E-04

付 錄-2

(1) CDD計算式

(2) CDD計算結果

(1) CDD 計算式

ASTM で規格化されている CDD の計算式を式 3.7 に記す。

$$CDD(\%) = \frac{C \times \sigma \times \Delta p}{MTF(1/2f) \times D\mu b} \times 100 \quad (\text{式 3.7})$$

C : 定数(検出効率: メーカ設計上では 6.77)

σ : ノイズ

Δp : 画素サイズ (cm)

MTF(1/2f) : 空間分解能

$D\mu b$: 検査体の減衰率

(2) CDD計算結果

1/2D	MTF(1/2D)	ノイズ		C	Δp	D/ Δp	線吸収係数 SUS	CDD	
		机上評価	実測値					計算(SUS)	実測(SUS)
50.0000	9.9997E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.67E+02	2.574E-01	2.1968E-01	3.2052E-01
25.0000	9.9990E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	8.33E+01	2.574E-01	4.3939E-01	6.4109E-01
16.6667	9.9976E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	5.56E+01	2.574E-01	6.5917E-01	9.6176E-01
12.5000	9.9958E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	4.17E+01	2.574E-01	8.7905E-01	1.2826E+00
10.0000	9.9935E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	3.33E+01	2.574E-01	1.0991E+00	1.6036E+00
8.3333	9.9906E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.78E+01	2.574E-01	1.3193E+00	1.9249E+00
7.1429	9.9872E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.38E+01	2.574E-01	1.5397E+00	2.2465E+00
6.2500	9.9832E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.08E+01	2.574E-01	1.7603E+00	2.5684E+00
5.5556	9.9788E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.85E+01	2.574E-01	1.9812E+00	2.8907E+00
5.0000	9.9738E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.67E+01	2.574E-01	2.2025E+00	3.2135E+00
2.5000	9.8957E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	8.33E+00	2.574E-01	4.4397E+00	6.4778E+00
1.6667	9.7667E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	5.56E+00	2.574E-01	6.7475E+00	9.8449E+00
1.2500	9.5888E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	4.17E+00	2.574E-01	9.1636E+00	1.3370E+01
1.0000	9.3646E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	3.33E+00	2.574E-01	1.1729E+01	1.7113E+01
0.8333	9.0971E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.78E+00	2.574E-01	1.4488E+01	2.1139E+01
0.7143	8.7902E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.38E+00	2.574E-01	1.7493E+01	2.5524E+01
0.6250	8.4481E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.08E+00	2.574E-01	2.0802E+01	3.0351E+01
0.5556	8.0754E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.85E+00	2.574E-01	2.4482E+01	3.5721E+01
0.5000	7.6771E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.67E+00	2.574E-01	2.8614E+01	4.1749E+01
0.4545	7.2582E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.52E+00	2.574E-01	3.3291E+01	4.8574E+01
0.4167	6.8239E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.39E+00	2.574E-01	3.8629E+01	5.6362E+01
0.3846	6.3795E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.28E+00	2.574E-01	4.4764E+01	6.5313E+01
0.3571	5.9298E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.19E+00	2.574E-01	5.1863E+01	7.5671E+01
0.3333	5.4798E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.11E+00	2.574E-01	6.0130E+01	8.7733E+01
0.3125	5.0341E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	1.04E+00	2.574E-01	6.9818E+01	1.0187E+02
0.2941	4.5969E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	9.80E-01	2.574E-01	8.1237E+01	1.1853E+02
0.2778	4.1719E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	9.26E-01	2.574E-01	9.4777E+01	1.3829E+02
0.2632	3.7626E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	8.77E-01	2.574E-01	1.1093E+02	1.6185E+02
0.2500	3.3718E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	8.33E-01	2.574E-01	1.3030E+02	1.9011E+02
0.2381	3.0017E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	7.94E-01	2.574E-01	1.5368E+02	2.2423E+02
0.2273	2.6544E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	7.58E-01	2.574E-01	1.8206E+02	2.6564E+02
0.2174	2.3311E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	7.25E-01	2.574E-01	2.1674E+02	3.1623E+02
0.2083	2.0326E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	6.94E-01	2.574E-01	2.5937E+02	3.7844E+02
0.2000	1.7594E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	6.67E-01	2.574E-01	3.1214E+02	4.5542E+02
0.1923	1.5114E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	6.41E-01	2.574E-01	3.7789E+02	5.5136E+02
0.1852	1.2882E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	6.17E-01	2.574E-01	4.6043E+02	6.7179E+02
0.1786	1.0890E-01	0.0464	0.0677	6.77	0.3	5.95E-01	2.574E-01	5.6482E+02	8.2410E+02
0.1724	9.1279E-02	0.0464	0.0677	6.77	0.3	5.75E-01	2.574E-01	6.9791E+02	1.0183E+03
0.1667	7.5833E-02	0.0464	0.0677	6.77	0.3	5.56E-01	2.574E-01	8.6903E+02	1.2680E+03
0.1250	6.3775E-03	0.0464	0.0677	6.77	0.3	4.17E-01	2.574E-01	1.3778E+04	2.0103E+04
0.1000	3.6569E-06	0.0464	0.0677	6.77	0.3	3.33E-01	2.574E-01	3.0035E+07	4.3823E+07
0.0833	-1.5321E-06	0.0464	0.0677	6.77	0.3	2.78E-01	2.574E-01	-8.6030E+07	-1.2552E+08