

JAERI-Conf

95-006



平成5年度JRR-3M
中性子ラジオグラフィ研究会報文集
1994年2月3~4日, 東海村
(協力研究)

1995年3月

研究炉部

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、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、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

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

平成 5 年度 JRR-3M 中性子ラジオグラフィ研究会報文集

1994 年 2 月 3 ~ 4 日、東海村

日本原子力研究所東海研究所

研究炉部

(1995 年 2 月 14 日受理)

本報文集は平成 5 年度 JRR-3M 中性子ラジオグラフィ研究会において行われた講演を基に、それぞれの研究者が執筆した論文を収録したものである。

JRR-3M 中性子ラジオグラフィ装置は平成 3 年度より所内研究室及び協力研究（大学開放研）による一般利用を開始した。これらの成果は隨時、学会、学術誌などに発表されてきたが、研究者がそれぞれの成果を持ち寄り討論をする場として年一回、JRR-3M 中性子ラジオグラフィ研究会を開催している。

平成 5 年度 JRR-3M 中性子ラジオグラフィ研究会は第 3 回目となり、平成 6 年 2 月 3、4 日の両日に開催された。研究発表 16 件、参加者 46 名であった。今回の研究会の特長は、講演者、すなわち一般利用者の増加とともに新分野における応用の提案、及び中性子ラジオグラフィ技術への新たな試みがなされたことである。応用に関しては、これまでの二相流や熱流動現象などの可視化、動植物への応用に加えて、宇宙用排熱システムや加圧流動層内の可視化、農林水産研究や文化財への応用が模索されている。

中性子ラジオグラフィの技術開発はその高性能化を目指して熱中性子、冷中性子の双方について行われており、画像処理技術についても引続いて報告があった。中性子イメージング・プロトの利用や高速度ビデオの適用は新技術の例である。中性子ラジオグラフィ以外にも本装置を照射場として利用した実験があった。このほか、外国における中性子ラジオグラフィの研究が 2 件紹介された。

今回の招待講演は、立教大学原子力研究所における中性子ラジオグラフィ研究、について行われた。

本研究会は、東京大学、京都大学、立教大学、武藏工業大学、名古屋大学、神戸大学との協力研究の成果を含む。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4

Proceedings of the Third Annual Meeting on Research and Application

using JRR-3M Neutron Radiography Facility

February 3~4, 1994, Tokai, Japan

Department of Research Reactor

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 14, 1995)

This proceedings contain research reports presented in the third annual meeting on research and application using JRR-3M neutron radiography facility.

The JRR-3M neutron radiography facility (JRR-3M NRF) has been open to the laboratories in JAERI and the Inter-University Joint Research Program using the JAERI Facilities as collaborative studies since FY1991. Good results obtained from the collaborative studies have been reported in the meetings of scientific societies or published on the scientific journals. The meeting of research and application using JRR-3M neutron radiography facility is held annually as a technical meeting on which researchers can report and discuss their results each other.

The third meeting was held in February 3 to 4, 1994. The 16 research reports were presented and the number of participants was 46 in the meeting. The growing number of users, the proposals of applications to new research fields, and the reports about advanced neutron radiography techniques should be emphasized as for this meeting. Visualization of heat transfer tube in space exhaust system and visualization on bubbles behavior in pressurized fluidized bed newly joined in the application of neutron radiography. Neutron radiography technique was also applied to agriculture, forestry and fisheries research and cultural properties on trial.

The research and development of neutron radiography technique is being advanced for thermal neutron radiography and cold neutron radiography. Development of image processing technique was also reported. The neutron imaging plate

This Proceedings include the results of Joint-Research with Tokyo Univ., Nagoya Univ., Musashi Inst. Tech., Kobe Univ., Kyoto Univ. and Rikkyo Univ..

and the high-speed neutron VTR exemplify the advanced techniques. The result of experiment in which JRR-3M NRF was used as the irradiation field was also reported. Besides all these, two reports about research using neutron radiography outside Japan were presented.

The invited presentation in this meeting was 'Research and Development of Neutron Radiography in Institute for Atomic Energy, Rikkyo University'

Keywords: Neutron Radiography, JRR-3M, Visualization, Neutron, Imagingplate, High-speed Neutron VTR, In Vivo Neutron Radiography

目 次

1. 主催者挨拶	白井 英次（原研、研究炉部）	
	伊藤 泰男（東大・原総センター）	1
2. 招待講演 立教大学原子力研究所における中性子ラジオグラフィの研究	小林 久夫（立教大学原子力研究所）	3
3. 研究発表 1 中性子ラジオグラフィの研究開発		15
3.1 高性能ラジオグラフィ技術の開発	玉置 昌義（名古屋大学）	17
3.2 冷中性子ビームによるラジオグラフィの基礎研究	小田 将広（名古屋大学）	53
3.3 中性子イメージングプレートと中性子ラジオグラフィへの応用	新村 信雄（原研・先端基礎研究センター）	70
3.4 実時間画像歪み補正法の開発	持木 幸一（武蔵工業大学）	92
3.5 ミシガン大学における中性子ラジオグラフィの研究	松林 政仁（原研・研究炉技術開発室）	108
3.6 医療照射用同時モニタ検出器の方向依存性	横尾 健司（原研・研究炉利用課）	116
4. 研究発表 2 中性子ラジオグラフィの応用		127
4.1 中性子ラジオグラフィによる二相流中の液膜測定	大久保 努（原研・伝熱流動研究室）	129
4.2 中性子ラジオグラフィによる加圧流動層内気泡成長の可視化	加藤 泰生（山口大学）	139
4.3 熱流動現象の可視化と計測	竹中 信幸（神戸大学）	149
4.4 中性子ラジオグラフィによる宇宙用排熱システムの伝熱管内の可視化	中澤 武（神戸商船大学）	156
4.5 高速度ビデオを用いた高速流体现象の可視化	日引 俊（京大原子炉実験所）	163
4.6 マウスおよびラットの In vivo 中性子ラジオグラフィ撮像	加藤 一夫（稻沢市民病院）	178
4.7 放射性廃棄物貯蔵用多孔物質研究への中性子ラジオグラフィの応用	F.ペテルカ（チェコ）	186
4.8 中性子ラジオグラフィの植物研究への応用	中西 友子（東京大学）	190

4.9 農林水産研究における中性子ラジオグラフィの利用

宮本 進（農林水産省畜産試験場）	195
5. 閉会挨拶 古平 恒夫（原研・研究炉技術開発室）	201
6. あとがき	202
付録 1 平成 5 年度利用状況	203
付録 2 平成 5 年度 JRR-3M 中性子ラジオグラフィ研究会プログラム	204
付録 3 研究会出席者名簿	206

Contents

1. Opening Adress	Eiji Shirai (JAERI)	
	Yasuo Ito (Tokyo Univ.)	1
2. Invited Presentation		
	Research and Development of Neutron Radiography in IAERU	
	Hisao Kobayashi (IAERU)	3
3. Session 1 (Research and Development)		15
3.1 High Quality Neutron Radiography		
	M. Tamaki (Nagoya Univ.)	17
3.2 Basic Research of Neutron Radiography using Cold Neutron Beam		
	M. Oda (Nagoya Univ.)	53
3.3 Application of Neutron Imaging Plate to Neutron Radiography		
	N. Niimura (JAERI)	70
3.4 Development of Real-time Corrector		
	K. Mochiki (Musashi Inst. Tech.)	92
3.5 Research of Neutron Radiography at the University of Michigan		
	M. Matsubayashi (JAERI)	108
3.6 Angular Sensitivity Distribution of Detectors for BNCT		
	K. Yokoo (JAERI)	116
4. Session 2 (Application)		127
4.1 Measurement of Liquid Layer in Two-phase Flow by Neutron Radiography		
	T. Ookubo (JAERI)	129
4.2 Visualization on the Bubbles Behavior in a Pressurized Fluidized Bed with Neutron Radiography		
	Y. Kato (Yamaguchi Univ.)	139
4.3 Visualization and Measurement of Heat Transfer Phenomenon		
	N. Takenaka (Kobe Univ.)	149
4.4 Visualization of Thermal Management System in Space using Neutron Radiography		
	T. Nakazawa (Kobe Univ. of M. Marine)	156
4.5 Visualization of Fluid Phenomena using a High Speed Video		
	T. Hibiki (KURRI)	163
4.6 Neutron In VIVO Imaging of Mice and Rats		
	K. Kato (Inazawa M. Hospital)	178
4.7 Radioactive Waste Storage Rock Porosity Study using Neutron Radiography		
	Frantisek Peterka (Czech)	186

4.8 Application of Neutron Radiography to Plant Research	
T. M. Nakanishi (Tokyo Univ.)	190
4.9 Application of Neutron Radiography for Research in Agriculture, Forestry and Fisheries	
S. Miyamoto (NIAI)	195
5. Closing Remarks	Tsuneo Kodaira (JAERI)
6. Editor's Notes	201
Supplement 1 FY1993 Machine Time	202
Supplement 2 Meeting Program	203
Supplement 3 List of Participants	204
	206

1. 主 催 者 挨 捶

白井 英次（原研、研究炉部）

この度、多数の関係者の参加を得まして、第3回目となる平成5年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会を開催することになりました。私は、これまででは都合が悪く、今回初めて出席させて頂きましたが、これだけ多くの皆様の参加を頂きましたことは主催者側の一人と致しましてなによりの喜びであります。

おかげさまをもちまして、平成2年10月にJRR-3Mが完成し、ここに世界でも最高級の性能を有する、熱中性子及び冷中性子ラジオグラフィ装置が稼働を開始し致しました。中性子ラジオグラフィの役割、意義等につきましては理解していたつもりであります。正直なところ、JRR-3の改造を進めていましたときには、この装置がどこまで利用されていくのか疑問がありました。特に、どんな利用があるのか、どの程度の利用者が期待されるのか、心配をしておりました。しかし、前2回の研究会が成功裡に終了し、そして、さらに新しい参加者を得て、本日の発表にありますように研究・開発の分野が広がったのを見まして、大変安心を致しました。

高性能の施設ができるることによって、研究・開発のレベルが上昇することはよく言われることですが、本装置も同様の現象がみられるものであります。これまででは、単純な透過写真を撮影することが主でしたが、エレクトロニクス分野の発展と相まって、JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置では、流体の挙動、特に、二相流の挙動観察のような動的な画像の解析に注目が集まっています。多大な成果を得ているとのことは、装置を製作し、維持管理し、利用していく立場としても喜ばしいことであり、また、今後を期待したいものと考えております。私達といたしましても、これだけの高性能の装置を独占していくことは考えておりません。今後も様々な機会を通じまして利用の拡大を図っていきたいと考えておりますので、これからもよろしくお願ひいたします。また、このような研究会につきましてもできるだけ続けていきまして、交流の場としていきたいと考えておりますので、皆様のご協力をお願ひいたします。

本日は、短い時間でありますのでお忙しいことは存じますが、皆様におかれまして、アイデアに富んだ研究成果の御発表と活発な討論を通じまして、実り多い結果が得られますことを期待いたしまして、挨拶に代えさせていただきます。

伊藤 泰男（東大・原子力総合センター）

皆さまご承知のように、東京大学・原子力研究総合センターは原研の多くの大型研究施設を用いた全国共同研究を大学側としてとりまとめており、通称「大学開放研究室」とよばれる、大学研究者が活動する場を原研の一隅に保持しています。開放研究室は放射化分析、中性子照射実験、中性子ビーム実験などの研究用原子炉を用いた研究だけでなく、ガンマ線や電子線などによる照射実験、イオン加速器を用いた広範な研究、アクチノイドの取扱いに関連した研究、など数え切れないほど多彩な研究の機会と便宜を大学の研究者に提供する役割を担っています。原研の創立後数年にして生まれて既に30数年の長い期間にわたって存続している大学開放研究室の歴史の中では、中性子ラジオグラフィーは発足後ほぼ10年後に研究課題として現れて

きているので、放射化分析や中性子散乱などに比べると遅れて始まっています。それは当時の原子炉では質の良いビームをが取り出せるようになっていなかったこと、また現在のように画像処理などの優れた技術が発展していなかったことが主な理由だと思われます。私も当時の中性子ラジオグラフィーを傍らで拝見していて、あまり明るい見通しを感じなかった覚えがあります。

ところが、この数年間で中性子ラジオグラフィーは著しく展開したように見受けます。それが JRR-3M の優れた中性子ビームと最近の諸技術の進歩に負うものであることは明かで、これから中性子ラジオグラフィーの時代が始まろうとしていると云っても間違いではないようです。ここに集まっておられる中性子ラジオグラフィーの専門家の方々には心からお喜び申し上げるとともに、皆様連携して技術としての深さと利用の範囲の広さの両方に向けて中性子ラジオグラフィーを育てる努力をされるよう切にお願いします。

ところで、今社会における「原子力」の姿が変わりつつあります。これまで「原子力」はエネルギー生産に強く傾斜していたために、原子力即「原発」であるという捉え方が社会的な雰囲気になってしまっています。これはとても好ましくないことですが、一方ではこれを反省するところからある種の積極的な視点が生まれつつあります。「原子力」を見る目をエネルギー生産に重心を置く立場からわずかにずらせると、はば広い分野があることに気がつきます。その意味で中性子散乱が原子炉中性子利用の大きな部分を占めている現状は象徴的ですが、原子力の持っている可能性はもっと広範なものであるはずです。中性子ラジオグラフィーは当然のこと、放射化分析や即発ガンマ線分析など多くの基礎技術とその利用が原子力を固めていくことになるでしょう。

このような展望があるとすれば、大学開放研究室にもまだまだその役割を自覚するところがある訳ですが、現在「原子力」が置かれている社会的な位置に關係して、大学開放研究室の運営も苦しくなってきています。原子力バラ色の時代に原子力基礎研究を育成する目的で生まれた大学開放研究室は当時の過保護の体質を残していて、利用者が大学開放研究室を育て、応援し、利用するという立場が希薄です。多くの研究者は大学開放研究室が僅かではあるかもしれないけれど金を自動的に持っていると思っていて、原子力研究総合センターが毎年血の出るような概算要求の苦しみをしていることに考えが及んでいません。これからはこのような体質を改善しないと大学開放研究室が存続できなくなる恐れすらあります。大学開放研究室が研究者の皆さんをどの程度応援してあげられるかは、皆さんのがどれだけの成果をあげるかにかかっています。皆さんのが研究成果をあげることが大学開放研究室の存在意義を実証し、それが大学開放研究室の運営を強化する...というブートストラップの関係を形成することを大学開放研究室と皆さんとの共通の認識にすることを強調したく思います。

皆様のご健闘を祈ります。

2. 招待講演

立教大学原子力研究所における
中性子ラジオグラフィの研究

小林 久夫
立教大学原子力研究所

I. はじめに

立教大学原子力研究所においては、TRIGA-II 100kW 研究炉(立教炉、RUR)が、1961年12月臨界になった直後、付属プール内に中性子ラジオグラフィ(NR)撮影用照射円筒箱(垂直照射管)を作成し、NRの研究に着手している。その後、1984年中頃より、立教炉の有効利用をはかるプロジェクトの一つとして、中性子ラジオグラフィがあらためて取り上げられ、直ちに研究が開始された。その結果、当所のNR照射設備は、少なくとも二つの段階を踏んで実施されることが同年内に決定された。第一段階としての、垂直照射管は、1985年に炉タンク内に設置され、直ちに基礎データの取得実験が開始され、1986年7月には全ての予定された計画を完了した^[1]。次いで、1986年10月には、上で得られたデータを基にして、本格的なNR照射設備を No.2 タンゼンシャル水平 実験孔に設置した^[2,4]。以降、当研究所では、NRに関する基礎的研究を中心に、その実用化を図り、同時に共同利用により、他大学・研究所と共に、応用研究を実施してきている。

本報告は、立教炉におけるNR照射施設、ならびに関連諸設備・機器の概略を紹介し、今日までに当所を中心とした基礎的な研究および応用研究、また全国共同利用による共同研究により実施された諸グループによる様々な研究の成果について紹介する。

II. 立教炉におけるNR施設・設備・機器

2・1 主なNR照射施設

2.1.1 垂直中性子照射管(現在使用停止中)

立教炉におけるNR装置は、NR研究の第一段階として、1985年に10 cm ϕ の垂直型照射管を試作、炉タンク内に設置された^[1]。コリメーター開口部Dは、4.80±0.05 cm ϕ の円形で、木製にCd板でライニングしたものであり(充分コリメータとしての役割を果たしていることが確認されている)、不要な γ 線バックグラウンドの低減のために、環状のPbリング材を付加している。このPbリング材は、同時に、照射管全体の浮力(比重を1よりわずか大としている)調整錘としての役割も果たしている。照射野は、10cm ϕ であり、L/D値は、111、(L=532.1±0.4 cm)である。また、中性子束密度は、 7×10^5 n/(cm 2 s)、Cd比は4.3、n- γ 比は 6.9×10^5 (n/cm 2)/(10 μ Sv) [= (n/cm 2)/mR] である。このビームでの通常のフィルム撮像は、約50分で完了できる。

上の垂直照射管を用いた基礎データの取得により、フィルム法におけるフルエンス(照射時間)-光学的濃度値との関係、中性子束密度の空間分布(均一性: ±8.2%)、各種線質計(ASTM/RISO-BPI, SI等)を用いた線質測定、L/D測定治具の試作と測定、各種コンバータの試作と試験、等が集中的に実施された^[1,2]。共同研究による様々な、応用研究も同時に行われた。例えば、自動車用キャブレター内の"す"の検出と鋳造法改良研究^[4]、歯科試料を用いたX線利用ハイブリッドラジオグラフィの研究^[5]、"ヒト"の結石の内部層状構造の可視化による成因の研究^[6]、ラットの脳中の水分量定量の試み(未発表)、等が実施された。

2.1.2 水平実験孔を用いた NR 設備(RUR/N2)

立教の TRIGA 炉には、水平実験孔が4本設置されている。NR 用に用いた水平実験孔は、タンゼンシャル型の炉心を直接望まない形式のもので、黒鉛反射体から導出されているため、熱中性子成分が比較的多く、 γ 線成分の比較的少ないビームを得ることができる^[2]。この水平実験孔に装着した $4.0\text{ cm}\phi$ (現在は $2.9\text{ cm}\phi$) 可変コリメーターの最先端には、 ν/γ 比向上を目的に Bi 単結晶をフィルターとして置くことが可能な構造になっている(現在は使用していない)。可変コリメーターの比($L/D=300\sim30$)にもよるが、本装置から撮影部において、照射野が $20\text{ cm}\phi$ 、熱中性子束密度が上の L/D 値に対応し $10^6\sim10^7\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ の実用に足るビームが得られている。通常の Gd-フィルム系での撮影は20分～2分で完了する。

照射野における熱中性子束は、Auの、また混入する速中性子束成分は、S および P の放射化分析により測定した。本装置による中性子ラジオグラフィ像は、主として $25\mu\text{m}$ の Gd コンバーターと、KODAK 製 SR-5 フィルムとの組合せを用いて撮影した。これらのコリメーターの諸特性は、ASTM E545-1986 規格の像質計(SI, BPI、米国 Research Chemical 社)を用いて決定した。

可変コリメーターは、先端部コリメーター群、中性子遮蔽リング群、 γ 線遮蔽リング群、スペーサー群および射出部ビーム絞り群より成る。現在選択可能なコリメーター径 D は $1.0\text{cm}, 1.5\text{cm}, 2.0\text{cm}, 2.9\text{cm}, 4.0\text{cm}, 10.0\text{cm}$ および 15.0cm 、射出口径 D_{out} は $1.0\text{cm}, 2.0\text{cm}, 5.0\text{cm}, 10.0\text{cm}$ および 20.0cm を各々任意に選択できる。これにより、同一照射野において、通常利用で 110 の L/D 値を 20 から 320 まで変更可能である。さらに、中性子断層撮影のための、幅 15.0cm 、間隙が 0.2cm から 6.0cm までを 0.1cm ステップで可変出来る矩形スリット状のビームも形成できる。さらに現在は、直徑 15 cm の平行ビーム生成用コリメータを試作中である。

この可変コリメーターの一例として $D=10.0\text{cm}$ 、 $D_{\text{out}}=5.0\text{cm}$ とした場合の中性子束密度は、通常設定 $D=2.9\text{cm}$ 、 $D_{\text{out}}=20.0\text{cm}$ の 9.8 倍であった。すなわち、射出口における中性子束密度は、従来の $3.2\times10^6\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ に対して $(3.12\pm0.04)\times10^7\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ と約 10 倍増強できる。また、Cd比はあまり変わらず、従来の 2.2 から 1.90 ± 0.02 と測定された^[4]。このビームは、高中性子束密度が要求される中性子テレビジョンや、中性子透過像拡大撮影等に使用されている。

この可変コリメーターは、中性子ラジオグラフィは勿論のこと $1.0\text{cm}\phi$ 、 $2.0\text{cm}\phi$ などのビーム実験も可能である。このビームを用いて中性子の直達透過線に混在する散乱線成分の極小化をはかることができる。さらに、矩形スリット型ビームは、例えば CT 実験に使用することを想定している。これも CT に有害な散乱線成分の軽減をはかる一つの方式といえる。

2.1.3 照射施設

照射施設^[4]は、ビームキャッチャおよび広い空間を有した遮蔽室 ($4.05\text{ m}^L \times 1.4\text{ m}^W \times 2.3\text{ m}^H$)より成る。ビームポート開口部 (20 cm ϕ)より射出する強い中性子線 ($\sim 1.33\text{ Sv/h}$)および γ 線 ($\sim 0.22\text{ Sv/h}$)の大部分は、可動ビームキャッチャにより吸収される。その結果、ビームおよびその近傍を除けば遮蔽室内の空間線量率は、中性子線、 γ 線共に $1/10^3 \sim 1/10^4$ 程度と大幅に軽減されている。線量率は、遮蔽室内の大部分の場所で n, γ 合わせて 0.1 mSv/h の程度、散乱線の影響の強いところでも $\sim 1\text{ mSv/h}$ の程度と低減され、実験時における遮蔽室内での短時間の作業を可能としている。また、遮蔽室の外部での線量率は、原子炉室の他の場所と同程度に低減しており、他の諸実験に支障のないレベルとなっている。以上、本遮蔽装置は、中性子ラジオグラフィ以外のビーム実験にも利用できる汎用の装置として設計通り、あるいはそれ以上の性能を有しており、かつ他の諸実験に悪影響を与えることなく同時平行的に遮蔽室のビーム実験を遂行することを可能としている。

2.1.4 付属設備 (ビームシャッタ、ビームキャッチャ、ホイスト)^[4]

遮蔽室内での作業をより安全に行うことができるよう、ビーム開口部にエアーシリンダーを用い遠隔操作できるシャッターを設置した。このシャッターは、2秒以下で開閉できる。さらに安全性を高めるために、手動のシャッターを付加し、被曝の低減を図っている。その結果、シャッター閉時で手動シャッター表面からビーム軸上 30 cm における線量値は、 n, γ 合わせて 1 mSv/h 以下 (100 kW 定常運転時)となっており、定常運転時においても中性子ラジオグラフィ撮影作業を可能にしている。

ビームキャッチャは、レール上に設置されており、遮蔽室内をビーム軸に沿って移動できる。その結果、 L/D 値は、 D 固定で 1 対 2 の範囲で任意に設定できるようになっている。

遮蔽室内部には、重量物が操作できるように、2 tonまでのホイストが設置されている。

2・2 主なNR用機器

2.2.1 撮像装置と画像処理装置

当所にNR用として導入されているエレクトロニクス・システムの撮像装置は以下の三種である。

- (1)冷却型 CCD 撮像装置 : Hamamatsu C3140 (510 × 492 × 12bit, -40°C)
- (2)SIT 撮像装置 : Hamamatsu C2741-81
- (3)超高感度撮像装置 : MCP-II + CCD (特注品)

このうち主に用いられた撮像装置は(1)の冷却型 CCD であるが、このカメラは出力画像と信号強度の無歪性という特徴を利用して、主として定量的な NR 画像の取得とその解析に用いられている^[4,7]。また、出力信号のダイナミックレンジの広さを利用した中性子断層撮影にも用いられている^[8,9]。(2)および(3)は、感度の高さを特徴とし、動画像の取得や微弱中性子強度のもとでの NR 撮像に用いられる。

上記撮像装置に接続する画像処理装置は

- (1) Hamamatsu : C3366 インターフェース画像処理装置

(2)東芝高速画像処理用マルチプロセッサ装置：DSTP-9506 ($512 \times 512 \times 32\text{bit}$)

(3)日本アビオニクス：IMAE Σ -II ($512 \times 512 \times 8\text{bit}$)

がある。冷却型CCD撮像装置による画像取得は、(1)のC3366インターフェース画像処理装置によつてなされる。このC3366は、画像取得ばかりでなく、通常の画像処理はほとんど可能である。(2)の東芝社製DSTP-9506は、通常要求されるほとんど全ての基本的な画像処理に加えて、 512×512 の二次元画像のフーリエ解析を約2秒で行うことのできる高速のFFTが可能である。これを当所では主として中性子断層撮影のための画像処理に用いられる。このシステムには、大容量外部記憶装置として320MBのハード・ディスクおよび光磁気ディスク装置が接続されている。本システムにより、例えば冷却型CCD撮像装置からの画像のほぼ600画面を同時にハンドリング可能となっている^[4,8,9]。(3)のIMAE Σ -IIは、SITと接続し、動画像の取得に用いられている。

2.2.2 付属の機器、設備等

画像取得関連のものとしては、四軸試料駆動装置、フィルムプロセッサ関連、および関連施設がある。

1. 四軸試料駆動装置^[3]は、20 cm以上の大物の被写体を二次元走査する事によって画像取得を可能とする目的と、中性子断層撮影の目的のために設置された。さらにまた、この装置は、高信頼度立体画像取得のためにも用いられた^[3]。この装置は清水機電(現在は(株)LAI)製のIntelligent Actuator IA-C-M-4を用いて設計製作されており、主要な性能は以下の通りである。

X(水平)軸：ストローク 50 cm、位置分解能 $10 \mu\text{m}$

Y(垂直)軸：ストローク 30 cm、位置分解能 $10 \mu\text{m}$

Z(ピ-ム)軸：ストローク 20 cm、位置分解能 $10 \mu\text{m}$

θ (回転)軸： $-600^\circ \sim +600^\circ$ 、角度分解能 0.01°

この装置のコントロールは、手動モード、プログラム自動モード、または外部制御用インターフェースのRS232Cを介しての自動制御モード(PC9801使用)による。ここでプログラム自動モードは、4軸を同時並行的に256ステップのプログラムが可能である。

2. フィルムプロセッサ関連の各装置の概要と性能は以下の通りである。

(1)乾式フィルム現像装置

3M社製：SP Dry Film Processor 9014AA (133°C , 3.2 cm/s)

(2)フィルム転写装置

デュポン社製 CRONEX PRINTER(転写、および差分が可能)

(3)走査型濃度計

阿部設計 2405 型

スリット幅： $(2 \sim 100) \mu\text{m}^w \times (5 \sim 1000) \mu\text{m}^h$ 独立可変

走査速度： $2 \mu\text{m/s} \sim 1 \text{ mm/s}$ 可変

走査範囲： $30 \text{ cm (x)} \times 9 \text{ cm (y)}$

最小サンプリング間隔： $1 \mu\text{m (x)}, (10/6) \mu\text{m (y)}$

濃度分解能： 0.001 D (12bit ADCの出力の10回計測平均値)

インターフェース：RS232C およびパラレル

制御：PC9801

(4) 手動型濃度計

サクラ PDA15型

スリット: 0.5、1.0、2.0 mm ϕ

濃度分解能: 0.01 D

(1) の乾式フィルム(3M: INSPEX-II/SY1731)を用いたNRは、当所で初めて開発した方式で^[10]、その現像は3MのSP-DP9104AAを用いておこなわれる。(3)の阿部設計2405型走査型濃度計は、 L/D の高精度測定^[11]、およびフィルムの固有解像度の測定^[12]に使用されている。

その他の関連施設としては、現像用暗室と簡易暗室があるが、後者は炉室に設置されており、フィルムの詰め替え、乾式フィルムの現像、フィルム転写装置による転写などを行うことができる。

III. 立教炉を用いたNR研究の紹介

3・1 立教大原研を中心になされたNRに関する基礎的研究

立教炉(RUR)にNR照射施設が設置されたのは1984年である。立教大原研で、最初に実施された予備的な作業においては、当炉でNRが実施された場合に予測される、被写体に誘起される放射能評価であった^[13]。

NR技術は1960年代に一応完成した形となっている。しかし、これを実用に供する場合、中性子ビームの特性や、撮像系の特性とその限界などに関しての定量的な議論は深くなされることはなかった。立教グループにおける第一の研究目標はこの点の解明にあった。また、1980年代には高性能の各種撮像管それとともにエレクトロニクス技術の著しい発展によってNRは新しい展開をみせるようになってきた。この点に関しての基礎研究も当然これからの問題として主要な研究目的の一つとして設定されていた。

1990年後半には改造なったJRR-3Mで本格的なNR照射施設が稼動を開始し、従来より稼働している京大炉、武蔵炉(現在修理中)、近大炉、弥生炉などに加わり、多様な中性子ビームが出そろうこととなった。これら諸施設間のトレーサビリティを確保するという意味で、またエレクトロニクス技術を含むNR関連の基礎研究は、定量的なNRにおける信頼性の確保の上で従来以上重要な意味を持つようになってきている。

被写体に対しての論議としては、NR本来の実用目的となる欠陥検出能力に関する理論的実験的な解析、また各種物質の透過特性の実用的なレベルにおける定量化など、地道な研究も行われるようになってきた。これらの点におけるわが国が果たした役割は決して小さなものではなく、むしろ世界をリードするまでになっている。すなわち過去4回の「中性子ラジオグラフィ世界会議」(第1回—サンディエゴ、第2回—パリ、第3回—大阪、第4回—サンフランシスコ)に発表された論文数の推移とその内容を見れば明かである^[14-17]。取得画像の定量的な解析に関連して、上記ビームの定量化との相関において論ずることは、解析能力の向上にとって益々重要となりつつある。

中性子ビームの特性は、(1) ビームの幾何学的因素(L/D)と、(2) その線質(エネルギー分布)、加えて(3) 散乱線によって決定される。また、NR画像は上のビームの諸特性に加えて、(4) 撮像系の諸特性や、(5) 被写体の作るNR像固有の特性に依存

するが、これらの点に関する解析も進んでいる。さらに、(6)撮像技術もエレクトロニクス法を中心に積極的な研究が進んでいる。筆者とその共同研究者たちによってこれらの諸点が理論的に検討され、あるいは実用性のある治具、方式が提案され、あるいは新しい装置の性能検査が実施されつつある。以下に、立教原研を中心に行なわれた研究の概要を紹介する。

3.1.1 中性子ビームの幾何学的因子(L/D)測定の試み

L/D 値は、中性子ビームの非平行性を決定し、それによる画像の不鮮明度を与える因子として重要な量である。この因子の推定を目的として、 L/D 決定用治具が、ASTM E 803-91^[18]として提案されている。さらに、同様な提案がいくつかなされており、Domanus と Greim によってまとめられている^[19]。このうち筆者は、 L/D を 1% 以内で決定できる精密測定用の治具を提案した^[11](*The Kobayashi Method*^[19])。

上記ASTMの提案をはじめとして他の多くの測定方式は、 L/D の方位依存のことを考慮しておらず、結果として単に特定の方位の L/D 因子の決定をせざるを得ないかたちとなっている。しかし、ビーム形成のためのコリメータ開口部の形状は必ずしも円孔(軸対称)ではなく、正方形あるいは矩形のものすらある。このため、画像の解像度を詳細に論ずる場合には、 L/D 因子の方位依存が測定できる治具を考慮しないわけには行かない。上記 *The Kobayashi Method* は、この方位依存も考慮されている^[20]。

従来、幾何学的因子は L/D 値のみが興味の対象となっていたが、NR法を用いた計測性能の評価と確立の節で論ずるように、 L 値も寸法計測において重要な因子である。上の *The Kobayashi Method* は L 値も同時に 1% の精度で決定可能であるのが特長となっている^[11,20]。

3.1.2. 中性子ビームの線質(エネルギー分布)

中性子ビームの線質(中性子のエネルギー分布)は当然物質の透過特性に影響を与える。しかし、例えば熱中性子領域においてはビーム毎に線質が相違していることを考慮した議論は現在のところ少ない。せいぜい熱外、熱と冷中性子の相違程度を問題にするに過ぎなかった。しかし、熱中性子領域においても原子炉の反射体や減速材、フィルターの有無・種類で線質は異なるのであり、それに応じて透過特性は物質毎に異なった影響を受ける。少し定量的な解析を行う場合には、線質の相違による透過特性の差を考慮せざるを得ないのである。最近この点に関する実測に基づいたデータの蓄積と解析が進み^[4,21-24]、近々全く新しい発想による「線質計」が開発され提案される見通しとなっている。

3.1.3. 散乱線成分の評価

NR 画像の透過率に関連する量を問題にする場合、散乱線成分による擾乱を考慮しないわけには行かない。熱中性子ビームの場合 10-20 %、冷中性子ビームの場合 5 % の程度は散乱線成分の混入がさけられないからである^[23,24]。

散乱中性子線は試料自体に起因するものと近傍の実験器具、遮蔽体など不特定な散乱体からのものが混在しており、共にNR像内の位置と共に変化するバックグラウンドとして画像に歪みを与え画質を劣化せしめる。これを単純な計算などで補正することはほとんど不可能である。この点に関しては最近容易に評価補正す

る方法が提案され解決されている^[4,25]。なお、この補正方式は厳密なものではないが、方式の単純な割には、充分実用に足る精度を達成できることが実証されている^[4,25,27]。また、0.1 eV以上(Gdをコンバータとして用いた場合)の熱外中性子成分、あるいは撮像装置が γ 線にもし有感ならば、それもバックグラウンドとして同時に補正されてしまうことも特徴となっている。

3.1.4 実効的全巨視的断面積の導入と測定

前二節は、NR画像の透過特性を記述する際に必要となる全巨視的断面積に直接関連する基礎特性である。全巨視的断面積は、単色の中性子線に対して定義されており、NRで用いられる連続スペクトルを有したビームに対しては定義されていない。ビーム毎にスペクトルの相違する条件で取得されたNR像の透過特性は、ビーム毎に相違することになる。ビーム間でのトレーサビリティを得ることは定量的な議論をする際に欠かすことができない。

そこでまず、多少厳密性を犠牲にして透過特性が記述できる実用的な断面積、実効的全巨視的断面積が定義された^[26]。現在、立教炉のビームに対して、20種の物質の実効的全巨視的断面積を測定している^[26]。さらに、二三の物質について、冷中性子ビームを含む二三のビームに対する実効的全巨視的断面積を測定している^[21,22]。その結果、予測されたとおり、冷、熱間はもちろんのこと、熱中性子ビーム間においても実効的全巨視的断面積の微妙な相違がみとめられ^[21,23,25,28]、ビーム間で記述できるような量の体系化がNRにとって有益であることが明らかになってきた。現在、国内はもちろんのこと、世界各所の中性子ビームに対する実効的全巨視的断面積の測定が、ビームの実効エネルギーとの関連において体系化する作業が進んでおり、近々その結果を当所を中心まとめていく予定である。

3.1.5. 撮像系の特性評価と新しい撮像系の開発

NR固有のものとしてはコンバータの特性(伝達関数、固有分解能、(非)直線性)が画質に影響を与えるが、この点に関するシュミレーション解析は、Gdコンバータとフィルムの系で行われた^[12]。フィルム系でのESFの測定による固有解像度の実測はいくつかのコンバータ-フィルム系に対しても行われた^[23]。同時に、フィルム系におけるSN比の解析も行っている^[23,24]。

新しい撮像方式として乾式フィルムを用いた撮像方式が当所で開発された^[10]。この乾式フィルムは、液体を用いた現像作業を必要とせず、高感度であることが特徴であり、簡便なNR実験、あまり高解像度を必要とせず、特に早急に結果を必要とするNR、および学生実験等に利用されている。

また、従来坩堝などに使用されている焦熱窒化硼素PBN(Pyrolytic boron nitride)シート($10\mu\text{m} \sim 0.5\text{mm}$)を用いた新しい蛍光コンバータも開発され^[29]、その物理的特性も測定、発光機構の解析もおこなわれた^[30]。この新コンバータは、発光形式のコンバータとしては最も高分解能、すなわち固有分解能 $22\mu\text{m}$ が観測されており、従来 $\sim 100\mu\text{m}$ が泣きどころとなっていた、エレクトロニクス法における分解能を $\sim 30\mu\text{m}$ 、少なくとも $50\mu\text{m}$ 程度まで改善できるのではないかと期待している。

3.1.6 NR法を用いた計測性能の評価と確立

寸法計測法の信頼性確立に関する研究は、上記各節に関連する諸量(幾何学的因

子、固有解像度、散乱線、透過率、感度の直線性)が密接に関連している。特に、撮像面に平行な面内における計測においては、有限のL値(ビームの非平行性)による画像歪み、画像解像度とL/D値および検出系の固有解像度は、その信頼性確保に必須の因子である^[11,12,20,24,28]。この因子に関しては関連する各節を参照していただくこととして、寸法計測にはビーム軸(厚さ)方向の計測性能の検討もなされている^[20]。この場合当然、実効的全巨視的断面積および光学的濃度値計測性能(直線性とダイナミックレンジ)が強く関連する。それらの諸点は現在も継続して研究中である。

3.1.7. エレクトロニクス法と三次元画像取得法の開発

エレクトロニクス法に関しては、京大グループや名大グループがかねてから研究を行っている。彼らはSIT(Silicon Intensified Target Tube)、イメージオルシコン、II.(Image Intensifier)、PDA(Plasma Display Array)素子等様々な撮像管、検出器を用いての特性取得の研究^[31-33]やNR顕微鏡の試みも行っている^[34]。

立教大グループは、エレクトロニクス法の一環として、より良好な直線性、広いダイナミックレンジおよび空間歪みの無い撮像系としての冷却型CCD撮像装置に着目して、これをNRに初めて適用した^[4,7-9]。その結果は良好なNR画像を提供しており、静止画像の定量的解析^[4]や、下記高性能のNRCT^[8,9]に応用されている。

さらに、冷却型CCD撮像装置を用いた高性能のCT画像の取得は、上記計測性能に対する期待^[7,9]と共に、高性能中性子断層撮影を当初から目標としていた^[4]。実施された中性子断層撮影により測定されたCT値の良好な直線性を得ている^[8,9]。

さらに立教大原研においては、当初から中性子断層撮影法の開発はもちろんのこと、より効率的な三次元画像取得法の開発に強い関心を有していた。その一例として、24枚のNR画像から立体画像表示の方式も開発した^[3]。

3・2 共同研究による各研究分野への応用研究

国内の様々な研究グループにより立教大原研で実施された応用研究の代表的なものを列挙すると以下の通りである。

- (1) Al鋳造物内欠陥検出法の開発と鋳造法の改良 (三国工業:戸室他)
- (2) コンクリート内構造物の可視化 (日本スプライススリーブ、立大原研)
- (3) IQIの性能の相互比較 (京大炉:藤根、米田)
- (4) 金属中の水素吸蔵量分布の可視化 (名大:池田、玉置他)
- (5) 二層流の可視化 (名大:池田、玉置他)
- (6) 粉体流の可視化 (京大(現鳥取大):鎌田他)
- (7) 医学利用 (日本医大:田中他)
- (8) 歯学利用 (神歯大:若尾他)
- (9) 農学利用 (東大:中西他)
- (10) エレクトロニクス法によるNR法の開発
(名大:池田他、武藏工大:村田他、理研:鈴木他)

以上の項目のうちいくつかを取り上げてその概要を以下にしめす。

(1)のAl鋳造物の欠陥検出に関するNR研究は、立教大原研での研究が始まった直後から実施された。開発された内部欠陥検出法は直ちに鋳造法の改良に利用された^[1]。

コンクリートの欠陥解析、水分量の定量は重要なテーマであり、(2)はその要請に基づいて実施された。

米国の ASTM で制定されている IQI は、その性能のトレーサビリティ、加えて国内の中性子ビーム間の相互比較のために、「NR研究会」の共同研究のテーマとして取り上げられ、当研究所でも実施された^[35]。

金属中の水素吸蔵量分布の可視化(4)は、近年話題となっている低温核融合の研究に関連しておこなわれているが、その研究の一部が当研究所でも実施された^[36]。

(5)(6)はそれらの研究の一部が当研究所で実施された。

(7)に関しては、ヒトの胆石の構造と成因に関して、X線ラジオグラフィおよび放射化分析と併用するかたちで研究された^[6]。また、ラットの頭部のNR撮像の試みと共に、脳中の水分量の定量の試みもなされた。さらに、中性子捕獲療法に関する組織中のBやGdの遍在の様子を中性子オートラジオグラフの手法で可視化する研究も行っている(未発表)。

(8)の歯学利用に関しては、歯牙中の栄養細管の挙動、充填物や铸造義歯の検査に応用された^[5,37]。

(9)の農学への利用は、東大グループによって当所ではじめて開始された。かれらは植物の形態および土壤水分動態の経時的かつ非破壊的な観察、定量にNRを利用した。より具体的には彼らは菜種の莢の生育過程の研究^[38,39]、大豆、稻等の根の土壤中からの水分の吸收状態の動的研究を行っている^[39]。NRは将来植物の新しい機能、生理の研究への応用が可能であり、また人工土壤の開発や土壤改良剤の開発等の性能検査にも利用されつつある。

(10)新しいエレクトロニクスNR法の試みは、名大グループ^[32,34]、武藏工大グループ^[27]、理研グループ^[40]によって実施されている。名大グループは、高感度NRカメラの試み^[32]、PDAの中性子断層撮影への利用^[33]、拡大NRの試み^[34]などが実施された。武藏工大グループは、高性能エレクトロニクスシステムの開発における諸試験に利用した。また、エレクトロニクス法における散乱線成分除去方式の開発も行った^[27]。理研グループは、気体蛍光体を用いた高感度カメラの特性試験に用いた^[40]。

3・3 工業分野への実用化研究

NRが事業として成立し得る試験対象物は、使用済核燃料要素をはじめとして、タービンブレイド、航空機のウイングや構造部材、宇宙飛翔体に使用される火工品、各種電子部品、キャブレター等の铸造品、各種熱交換器類、古文化財、建築部材等様々である。

世界におけるNR施設は主として実用本位に利用されており、例えば核燃料体の検査はオランダのペッテンや仏国のサクレイ、デンマークのリゾなど、タービンブレイドはカナダのチョークリバー国立研究所、米国のエアロテストなど、航空機部材は米国のマッククレランやアエロテストなど、火工品はエアロテストや仏国原子力庁などで盛んに検査されており、絵画の真贋検査は主としてレンブラントの絵画を対象として公的な検査法として採用され、独国ハーンマイトナー研究所で実施されている。

わが国では世界第1級のNR施設が研究用原子炉に設置されているにかかわらずこれを民間で利用することは必ずしも容易ではなく、二三の民間会社が加速器を

用いて細々と事業化しているのが現状である。検査対象もタービンブレード、火工品などと聞いている（あまり公表されていない）。研究用原子炉を用いた例としては前節で述べたような研究的な検査の他は、日本原子力研究所における使用済核燃料体の検査^[4]があるが、立教炉においてはキャブレタ内の「す」の検査を鋳造法の改良に使用した例^[5]、コンクリート内のスプライススリープによる鉄筋結合状態の検査がある程度である。しかし、いずれも事業として行われてはいない。研究炉を工業分野への実用化と結び付けることは、国外例えはチョークリバー国立研究所では行えても、国内ではいくつかの解決すべき問題があるようである。JISなどでの規格化がないこと、誘導放射能に対する安全性、火工品に対する考え方方が定まっていないこと、使用済核燃料等の輸送上の問題、各施設内の組織上の問題などである。

IV. あとがき

以上、立教大原研における、中性子ラジオグラフィ施設、関連装置等を紹介した後で、当施設で実施されたNR研究に関連したものを中心に概括したが、もちろんここで述べた以外で行われている研究も多々あることをお断りしておく。

NRの応用範囲は多岐にわたっており、単に非破壊検査の一手段に留まることなくまだ多くの研究分野への応用が考えられる。上述の諸テーマの他にとりあえず金属合金等の結晶構造や結晶粒界の可視化、建築材料の検査、果実の結実過程の動的観察、小動物や昆虫類の動態観察、などの分野でNRが役に立つことがあるのではなかろうか。また、わが国で試験的にしか行われていない分野として、航空機部品の腐食・接着剤・湿気等の健全性検査、宇宙・化学工業等におけるシール材の健全性検査、自動車工業における燃料・オイルの動態検査、各種熱交換器・配管内の流体の観察・検査、コンジットパイプ中のケーブル検査、材料工学における硼素等の分布・結晶状態の検査、セラミックスの欠陥・密度分布・多孔性の検査、土木工学における土砂中の水の動態検査、コンクリートや煉瓦内の水の含有量・挙動の検査、火工品の健全性検査、文書等のインクや水素含有物の検査、絵画彫刻類等美術品の鑑定、古代遺物、壺等の非破壊内部観察、青銅器・鉄器に付着した木片・織物等の観察、等なども考えられる。

NRにおいては研究者が極端に少ないのであるが、NR自身の性能、特性を極める仕事、特にエレクトロニクス撮像静・動画像の特性評価法を確定する仕事等はまだまだあり、また新しい撮像技術の開発、撮像系の感度や分解能の性能向上は新しい研究分野に利用できる道を開くわけでありこの点に関しても研究の余地があると考えている。また、X線ラジオグラフィとの併用は新しい検査能力を付加するわけでこのようなハイブリッド検査法^[6]の開発も有益であり、検出系の性能向上と相俟って新しいNRの実用可能性への道を開くことになろう。

参考文献

- [1] H.Kobayashi et al., "Neutron radiography at Rikkyo TRIGA-II reactor", NR-2 (1987) 129-136.
- [2] H.Kobayashi, "Neutron radiography research in Rikkyo university", Proc. 1st Asian

- Symp. on Res. Reactors*, (Tokyo, 1986) 360-370.
- [3] H.Kobayashi, S. Utsunomiya, and J. Hamasaki, "Novel stereoscopic imaging technique for neutron radiography", *NR-3* (1990) 315-324.
- [4] H.Kobayashi, "Studies of neutron transmittance measurements using cooled CCD camera", *Neutron Radiography System Design and Characterization*, eds. G. M. MacGillivray and S. J. Brenizer, Jr., (Canadian Nucl. Soc., 1994) 189-208.
- [5] H.Kobayashi, et al., "Enhancement of image contrast by combination of neutron and X-ray radiography", *NR-2* (1987) 791-796.
- [6] M.Tanaka et al., "A study of the internal structure of gallstones based on the difference between the interactions to elements of thermal neutrons and X-rays", *Radioisotopes*, 37, (1988) 685-686.
- [7] H.Kobayashi, "Neutron radiography using cooled CCD camera", *NR-3* (1990) 421-428.
- [8] H.Kobayashi, "Recent development of cooled CCD camera for NR imaging-Tomography", *NR-4* (1992) 553-560; Inst. Atom. Energ. Rikkyo Univ. rept. IAERU-9202 (1992) 19-25.
- [9] H. Kobayashi: "High quality neutron radiography imaging using cooled CCD camera - Tomography", *Proc. 5th Int. Symp. Advanced Nuclear Energ. Res. - Neutrons as Microscopic Probes*. JAERI-M 93-228, Vol.2 (1993) P.413 p.846-853.
- [10] H.Kobayashi, "Characteristics of a dry type X-ray film on neutron radiography", *Neutron Radiography System Design and Characterization*, eds. G. M. MacGillivray and S. J. Brenizer, Jr., (Canadian Nucl. Soc., 1994) 64-73.
- [11] H.Kobayashi and H.Wakao, "Accurate measurement of L, D, and L/D for divergent collimators", *NR-3* (1990) 885-892
- [12] H.Kobayashi, "Response functions of screen-film systems", *NR-3* (1990) 893-902.
- [13] 小林久夫、「中性子ラジオグラフィ撮影時に生成される誘導放射能」IAERU-8601 (1986)
- [14] "Neutron Radiography", eds.J.P.Barton and P. v. Der Hardt, Proc. 1st World Conf.Neutron Radiography, (Reidel., Dordrecht, 1987) [NR-1 (1983)]
- [15] "Neutron Radiography", eds.J.P.Barton et al., Proc. 2nd World Conf.Neutron Radiography, (Reidel., Dordrecht, 1987) [NR-2 (1987)]
- [16] "Neutron Radiography (3)", eds. S.Fujine et al., Proc. 3rd World Conf. Neutron Radiography, (Kluwer, Dordrecht, 1990) [NR-3 (1990)]
- [17] "Neutron Radiography (4)", Proc. 4th World Conf. Neutron Radiography, (Kulwer, Dordrecht, 1992) [NR-4 (1994)].
- [18] ASTM E803-91, "Standard for determining the L/D ratio of neutron Rradiography beams", *Ann. Book ASTM Standards*, 1992, Sect 3, Vol. 03.03, (1992) 359-365.
- [19] J. C. Domanus and L. Greim, "Practical neutron Radiography", J. C. Domanus ed., (1992) 96-126.
- [20] H. Kobayashi, "Evaluation of three dimensional unsharpness on NR images", *NR-4* (1994) 683-691; *Nondestruct. Test. Eval.* 11, (1994) 77-85..
- [21] H.Kobayashi, "Preliminary study for cold neutron radiography", *Proc. 3rd Asian Symp. on Res. Reactor*, (Hitachi, 1991) p.589-596; *JAERI-M 92-028* (1992) 608-615.

- [22] H.Kobayashi et al., "Efficacy of cold neutron radiography", *NR-4* (1994) 403-412; *Inst. Atom. Energ. Rikkyo Univ. rept.* IAERU-9202 (1992) 1-10.
- [23] H. Kobayashi, "A quantification of neutron radiograms", *Proc. of IV-th Asian Symp. on Res. Reactor*, (1993) 175-183.
- [24] H. Kobayashi, "Metrological capability of neutron radiography", *Radiation Detectors and Their Uses*, Eds. M. Miyajima et al., KEK Proc. 93-8 (KEK, 1993) 174-185.
- [25] H.Kobayashi "An evaluation of detection limit for defects in materials", *NR-3* (1990) 903-912.
- [26] H.Kobayashi et al., "Macroscopic cross section measurements and defect detection in materials using neutron radiography technique", *J. Nucl. Sci. Tech.*, **29** (1992) 1045-1053.
- [27] Y.Murata et al., "Two-dimensional neutron image excluding the effect of scattered neutrons", *NR-4* (1992) 583-590.
- [28] 小林久夫, "中性子ラジオグラフィにおける画像計測", *放射線*, **19**, No.1, (1992) 3-19.
- [29] H.Kobayashi et al., "Development of new NR converter using pyrolytic boron nitride plate", *NR-4* (1992) 771-778; *Inst. Atom. Energ. Rikkyo Univ. Rept.* IAERU-9202 (1992) 27-34.
- [30] H. Kobayashi et al., "Continuum Optical Radiation Produced by H⁺ and He⁺ Ion Bombardment of Pyrolytic Boron Nitride", *Nucl. Instr. Meth.* **B90** (1994) 556-559.
- [31] G.Matsumoto et.al., "Real-time imaging with less intense neutronbeam", *NR-2* (1987) 547-553.
- [32] Y.Ikeda et al., "An advanced neutron imageing system using highly sensitive photon-counting camera", *NR-3* (1990) 413-420.
- [33] Y.Ikeda et al., "A new imaging device for neutron CT", *NR-3* (1990) 835-842.
- [34] Y.Ikeda et al., "A new experience for micro-neutron radiography", *Neutron Radiography System Design and Characterization*, (Pembroke, 1990) 105-116.
- [35] K. Katsurayama, et al., "Intercomparison of neutron radiography indicators using KUR", *NR-2*, (1987) 857-864.
- [36] M. Tamaki et al., "Neutron radiographic analysis of distribution of electrotransported hydrogen in palladium", *NR-4*, (1992) 105-112.
- [37] H.Wakao et al., "Application of neutron radiography for teeth and dental materials", *NR-3* (1990) p.723-730.
- [38] T.M.Nakanishi et al., "Non-destructive analysis of rape plant pod by neutron radiography", *Radioisotopes* **40** (1991) 126-128.
- [39] T.M.Nakanishi et al., "Appliccation of neutron radiography to plant research", *NR-4* (1992) 57-64.
- [40] M. Suzuki, et al., "Single neutron sensitive camera based upon a proportional scintillation imaging chamber" *Nucl. Instr. Meth.* **A333**, (1993) 484-491.
- [41] 鶴野晃、「照射済核燃料物質の中性子ラジオグラフィ」、第4回立教大学原子力研究所講演会論文集、IAERU-8802、(立教大学、1988)p.101-117.

3. 研究発表 1

中性子ラジオグラフィの研究開発

3.1 高性能ラジオグラフィ技術の開発

玉置 昌義（名古屋大学）

3.2 冷中性子ビームによるラジオグラフィの基礎研究

小田 将広（名古屋大学）

3.3 中性子イメージングプレートと中性子ラジオグラフィへの応用

新村 信雄（原研・先端基礎研究センター）

3.4 実時間画像歪み補正法の開発

持木 幸一（武藏工業大学）

3.5 ミシガン大学における中性子ラジオグラフィの研究

松林 政仁（原研・研究炉技術開発室）

3.6 医療照射用同時モニタ検出器の方向依存性

横尾 健司（原研・研究炉利用課）

3.1 高性能ラジオグラフィ技術の開発

玉置 昌義、Budi Santoso*、小田 将広

名古屋大学 工学部

1. 序論

非破壊検査において、従来から広く用いられている手段にX線ラジオグラフィーがある。本研究で扱う中性子ラジオグラフィーでは金属容器中の水の流動分布や高放射性物質等のX線ラジオグラフィーでは得ることのできない透過像を得る事ができる。中性子ラジオグラフィーは被写体に中性子ビームを照射し、被写体の吸収や散乱により減衰した中性子2次元分布を像として写し出す方法である。

中性子ラジオグラフィーの撮像方法は主にTV法、フィルム法、トラックエッチ法等があげられる。これらのデバイスはダイナミックレンジが小さく、定量的評価には限界がある。このため新しいデバイスとして半導体受光素子の活用が考えられてきた。本研究で用いた素子は微弱光測定に開発された浜松ホトニクス社製の半導体受光素子で、シフトレジスタにプラズマ結合素子(Plasma Coupled Device、PCD)を使用しているので、PCDリニアイメージセンサと呼ばれている。

実験に用いたPCD素子は暗出力を低減するために冷却して使用した。冷却ユニットにはペルチェ素子を使用し、-25°Cまで冷却して実験を行った。実験は日本原子力研究所の熱中性子ラジオグラフィー施設(TNRF-2)で行った。被写体の蛍光コンバータ上の中性子透過像を冷却型PCDリニアイメージセンサ上に結像させ、素子からの出力をA/Dコンバータによってデジタル化し、コンピュータに取り込み、データ処理及びCT再構成計算を行った。

本研究では中性子ラジオグラフィーの定量的解析のために冷却型PCDリニアイメージセンサとハニカムコリメータを用いて中性子束分布を定量的に画像化、解析する基礎研究を行った。ハニカムコリメータは被写体により散乱された中性子を除去するものであり、従来問題となっていた散乱中性子による定量性への影響を除去するものである。そのため中性子ラジオグラフィーによって物質の中性子に対する減衰係数を求め、それぞれの物質の巨視的全断面積の文献値と比較して定量性の評価を行った。また、PCDデジタルデータによる中性子CT再構成応用例として試みた。

* インドネシア派遣留学生

2. 中性子ラジオグラフィーの原理と実験システム

2-1 中性子ラジオグラフィーの原理

中性子ラジオグラフィーを行うためには中性子を連続的に被写体に照射する。この被写体は、中性子を吸収したり散乱したりすることで中性子ビームパターンを変化させる。そして検出器に達したビームは、被写体の構造を表わす2次元の強度パターンを持つ画像の形で情報を与える。

Fig. 1に中性子ラジオグラフィーの基本的な構造を示す。それは中性子源、コリメータ、コンバータ、検出器である。それぞれの中性子ラジオグラフィーの基本的な構造について以下に簡単に述べる。

本実験で使用した中性子源は原子炉である。実験は日本原子力研究所の熱中性子ラジオグラフィー装置（JAERI-TNRF2）で行った。

コリメータは熱中性子の方向を揃えて平行なビームを作るものである。コリメータは中性子断面積の小さいアルミニウム等の筒に中性子散乱防止のためにボロン等の中性子吸収材を内張りしたものが利用される。本施設で使用されているコリメータはダイバージェント型コリメータである。

一般に中性子はX線と異なり検出器と直接相互作用を起こさないため、中性子ラジオグラフィー像の記録には中性子量を相応の検出できる放射線（荷電粒子）あるいは光に変換することが行われる。この変換を行うのがコンバータである。コンバータには画像の記録方法の違いにより二次放射線を放出するだけのものと、その放射線によりさらに蛍光剤を発光させて使用するものがある。

本研究で用いているPCDリニアイメージセンサは光を検出する素子であるからコンバータにより中性子を光に変換する必要がある。本実験では使用した蛍光コンバータは化成オプトニクス製の⁶LiF-ZnS(Ag)系であり、その性能がNE426相当とされているものである。

2-2 PCDリニアイメージセンサシステム

本実験では、ダイナミックレンジを広くとることを目的として使用した検出器は冷却型PCDリニアイメージセンサである。Fig. 2にPCD素子の写真を示す。コンバータで光に変換された像パターンはフォトダイオードリニアアレイ(PDA)イメージセンサでとらえられ、16ビットA/Dコンバータによってデジタル化され、コンピュータに記録される。Fig. 3にPCD素子回路構成を示す。

2-2-1 半導体受光素子

本装置に用いている半導体受光素子は微弱光測定用に開発された素子で浜松ホトニクス社製の P C D リニアイメージセンサである[1-3]。受光部は一次元のフォトダイオードアレイ（単位素子 : $25 \mu\text{m} \times 2.5\text{mm}$ 、512素子）で構成されている。Fig. 4 に被写体像と対応関係を示す。P C D の一画素は $25 \mu\text{m}$ である。P C D リニアイメージセンサによる検出は以下の様になる。フォトダイオードに光が入射すると光電効果により電子正孔が生じ、並列に接続されたコンデンサに電荷が蓄積される。一定の蓄積時間（1 ms ~ 12,000 s まで可変）をおいた後、ソフトレジスタで走査し蓄積された電荷を取り出す。

この素子を使用する上で注意すべきことはあらゆる電子機器に言えることだが、オフセット成分である暗出力が生じてしまう、ということである。暗出力というのは、光が入射していない暗状態でもフォトダイオードの熱現像から発生する漏れ電流によって生ずる出力のことであり、フォトダイオードの出力に加算的に加わる。従ってこれはバックグランドとして差し引けば支障がないが、暗出力が高ければそれだけシステムのダイナミックレンジが狭くなり検出能力も低下してしまう。さらに暗出力のみで飽和電荷の達してしまう場合もありえる。実際の諸特性については後において実際の測定結果を詳しく述べる。ここでは暗出力の低減のために素子を冷却して用いたと述べるにとどめておく。次にその冷却に用いたペルチェ素子について述べる。

2 - 2 - 2 P C D 素子冷却ユニット

P C D 素子の冷却にはペルチェ素子を利用している。ペルチェ素子とはペルチェ効果を利用した固体冷却素子であり、ペルチェ効果とは、性質の異なる2つの金属、あるいは半導体を直列に接続した回路をつくり、これに電流を流した場合、2つの接合点の間で、一方は吸熱、他方は発熱するという現象である。使ったペルチェ素子はR M I 1 0 6 2型である[4]。製作した冷却装置は吸熱用、冷却用の銅製のブロックで挟んだもので構成される。吸熱ブロックはP C D センサに接触させており、冷却ブロックには冷却水がポンプで循環している。ポンプにはクーラーが組み込まれており、温度調整を行っている。Fig. 5 にP C D 冷却ユニットを示す。吸熱ブロックには熱電対が差し込んでおり、温度が測定できる。この冷却ユニットで -30°C 以下までに冷却することができる。冷却すればセンサが結露し、故障の原因となるのでそれを防止するためにセンサ及び冷却ユニットの入った箱の内部を乾燥窒素で置換し露点を下げて用いた。

3. 定量的中性子ラジオグラフィーの原理と方法

中性子ラジオグラフィーを利用することによって中性子減衰率を測定するに当たり、被写体

を透過した中性子は蛍光コンバータ面で中性子量に応じた光量に変換され、冷却型 P C D リニアイメージセンサ内で入射光量に応じた電流に変換され、電気信号で出力される。得られた画像に定量的評価を行うときに問題となるのが散乱中性子の影響である。この散乱中性子の影響を除去する方法について述べる。

3 - 1 散乱中性子の除去方法

定量的評価を行うときに問題となるのが散乱中性子の影響である。ある点において検出される中性子 I_t はその点において被写体を純粋に透過してきた中性子 I_p と、周囲から散乱されてその点に到達してきた中性子 I_s との和で与えられる。

$$I_t = I_p + I_s$$

物質の中性子の減衰は以下の方程式で表される、

$$I_p = I_0 \exp(-\Sigma_t x)$$

ここで、 I_0 : 入射中性子量

I_p : 透過後の中性子量

Σ_t : 被写体の全断面積

x : 被写体の厚さ

中性子ラジオグラフィーでは撮像データから上式の関係を用いて断面積 Σ_t を求める。従来の中性子ラジオグラフィーでは、散乱中性子の寄与分を含んだデータ I_t を用いて、中性子透過率を求めていた。こうした散乱中性子の入り込んでくる寄与割合は被写体が厚いほどその影響が大きい。このため同一の構成元素からなる被写体において、散乱成分の寄与割合の大きい厚い部分の透過率が実際の値よりも過大評価されるという現象が起こってくる。中性子 CTにおいても同様な効果があらわれる。このため散乱線量を評価する必要である。式で表せば

$$I_p = I_t - I_s$$

なる形でデータがとれる方が望まれる。

この散乱中性子の影響を除去しなければならない。散乱中性子の影響を見かけ上小さくする方法としては従来から被写体とコンバータの距離をあけて散乱中性子がコンバータ全体に広がるようにして効果をぼかしてしまう方法（ここでは散乱線分散法とよぶ）がある。さらに散乱中性子の影響を評価するための方法は小林らによって提案され、使用されている Cd グリッド

法である[5]。もう一つは散乱中性子成分を検出器に到達する前に除去してしまう方法で名古屋大学で開発したハニカムコリメータ方法である[6,7]。

Cdグリッド法は本研究で用いる検出法の制約からこの除去方法の採用は困難である。そこで本研究では散乱中性子の影響を除去する方法としてはハニカムコリメータ法を中心に用いて行った。比較のため、被写体コンバータ密着法のほかに散乱線分散法を用いた。ここではハニカムコリメータ法について述べる。

この散乱中性子の除去方法をFig. 6に示す。ハニカムコリメータは中性子をよく吸収する材料でできている。これはハニカムコリメータありの場合とハニカムコリメータなしの場合二つの状態である。Fig. 6 a のハニカムコリメータなしの場合について述べる。この場合は、像検出器のある点に検出される中性子は被写体により散乱も吸収もされることなく被写体を通過してきた純粹透過中性子と散乱により回り込んで重なってきた中性子である。次にFig. 6 b は被写体の後ろに入射中性子ビームと平行になるようにハニカムコリメータを設置した場合について示している。被写体を透過した中性子はハニカムに対し角度を持って入射することになり、ハニカムコリメータにより吸収され、検出器には到達しない。よって検出器に検出され、像を形成する成分中性子は被写体を通過してきた中性子のみであり、被写体により散乱された中性子を取り除くことができる。また中性子CTを行う場合にも散乱中性子の除去するためにこのハニカムコリメータ方法を利用した。

3-2 ハニカムコリメータ

本実験は散乱中性子を除去するために使用したハニカムコリメータはガドリニウム被覆ハニカムコリメータである。ガドリニウム被覆ハニカムコリメータは幅300 mm × 高さ 300 mm × 長さ 100 mm の外形である。単位ハニカムとしては直径3 mm × 長さ 100 mm である。ハニカム材質はアルミニウムで厚さ 0.033 mm である。Table I にガドリニウム被覆ハニカムコリメータ仕様を示す。

4. 中性子ラジオグラフィーの実験

4-1 PCD 中性子ラジオグラフィー装置

装置の概略は Fig. 7 に示す。本装置は被写体を透過してきた熱中性子ビームを蛍光コンバータによって光に変換し、そこに映し出された中性子透過像をミラー、レンズを介して冷却型 P C D リニアイメージセンサに結像させる。そして、その素子からの出力を A / D コンバータによってデジタル化し、コンピュータに記録するものである。

本研究は日本原子力研究所のJRR-3M内の熱中性子ラジオグラフィー施設(TNRF-2)を使用して行った[8]。この熱中性子ラジオグラフィー施設にPCDシステムを組み込んだ様子をFig. 8に示す。熱中性子コリメータはダイバージェント型で、先端を重水タンク内に置くが、その延長線は炉心を直接望まない接線状の配置なっている。

Table 2にTNRF-2の特徴を示す。TNRF-2は熱中性子束が $1.5 \times 10^8 n/cm^2 s$ 、コリメータ比(L/D比)が165であり、中性子束が高いことからリアルタイムの動態観察にも優れている。蛍光コンバータは $^{6}LiF-ZnS(Ag)$ 系を用いている。

4-2 PCD素子特性の測定

日本原子力研究所JRR-3MのTNRF-2に設置した条件下でPCD素子特性を測定した。撮像照射時間を求めるためにまずPCD素子の暗電流による素子飽和時間を室温から-30°Cにわたって測定した。その結果実験により用いる温度を-22°Cとしめ、室温で用いた時の比較も行うこととした。次に照射時間とPCD出力の関係すなわち、フィルム法でいう感度曲線を求めるために、照射時間を100 msから200 sの範囲で変えてPCD出力値を測定した。

なお、感度曲線として定量的ラジオグラフィー用に開発したハニカムコリメータを用いた場合についても求めた。Fig. 9に冷却したPCD素子によるハニカム無と有の場合のバックグランド撮像例を示す。冷却効果により暗電流が低くなっている。バックグランドはシェーディングと総称される種々のファクターにより中心に山をもち、ほぼ左右対称になっている。ハニカム有りの場合はハニカム構造とPCD素子の幾何学関係により特徴づけられる系統的なバックグランドの大きなばらつきが見られる。

4-3 実験条件

PCD素子の特性測定結果をもとに、本実験の設定条件としては以下に示すように決定した。

定量的中性子ラジオグラフィー:

- ・冷却なし

PCD素子温度 : 室温 (25°C)

レンズ : Micro NIKKOR 105 mm/1:2.8

ハニカムコリメータ : ガドリニウムハニカムコリメータ

蓄積時間(ハニカムコリメータあり) : 10秒

蓄積時間(ハニカムコリメータなし) : 10秒

・冷却あり

P C D 素子温度 : - 2 2 °C
 レンズ : Micro NIKKOR 105 mm/1:2.8
 ハニカムコリメータ : ガドリニウムハニカムコリメータ
 蓄積時間 (ハニカムコリメータあり) : 5 0 秒
 蓄積時間 (ハニカムコリメータなし) : 3 0 秒

中性子 C T :

・冷却あり

P C D 素子温度 : - 2 2 °C
 1 角度 : 7.2 度
 投影データ : 50個 (360度分)
 レンズ : Micro NIKKOR 105 mm/1:2.8
 ハニカムコリメータ : ガドリニウムハニカムコリメータ
 蓄積時間 (ハニカムコリメータあり) : 4 0 秒
 蓄積時間 (ハニカムコリメータなし) : 3 0 秒

C T の撮影条件であるが、一つの被写体について、1回転角度としての7.2度をとり、50回の撮像で360度の投影データセットを取得した。ガドリニウムハニカムありの場合の一つ投影データを撮影する時間を40秒としたため、一種類の被写体の投影データを全て取得するのに要する時間は33分程度である。ガドリニウムハニカムなしの場合は一つの投影データを撮影する時間を30秒で、一種類の被写体の投影データを全て取得するのに要する時間は25分程度である。

4 - 4 被写体

ハニカムにより散乱中性子除去効果を確認するために使用した被写体はステップウェッジと円柱である。使用したステップウェッジは鉄、鉛、銅、黒鉛とニッケルの4種類である。Fig. 10に鉄、鉛と黒鉛、銅、ニッケルのステップウェッジを示す。鉄、鉛及び黒鉛のステップは通常の形であるが、ニッケルのステップウェッジは最も薄い部分が10 mmで、最も厚い部分が40 mmであり、各ステップの間にB₄C入りのゴムがはさみこんであり、ステップ間の散乱中性子の干渉を除去することを目指した配置になっている。被写体と蛍光コンバータの距離はハニカムコリメータありの場合はハニカム厚さに相当する分の10 cmだけ離れており、ハニカムコリメータなしの場合は密着、1 cmと10 cmの3段階である。

この被写体のラジオグラフィー像から、ステップの各段における中性子減衰率を求め、中性子減衰率と被写体の厚さの関係をグラフにプロットし、グラフの勾配よりその物体の全中性子断面積を求める。

F i g . 1 1 に各種円柱の被写体を示す。この被写体は P C D 法による中性子 C T をテストするのに用いた。試料は鉄、鉛、銅、黒鉛、ニッケル、ステンレス、真鍮、チタンとアルミニウムである。円柱の直径は 10 mm で長さは 50 mm である。被写体と蛍光コンバータの最近接距離はハニカムコリメータありの場合は 11 cm、ハニカムコリメータなしの場合は 1 cm である。

C T の出力値 (C T 値) は中性子減衰率から計算される中性子全断面積であり、被写体の全断面積の文献値との対応関係を求め、ハニカムコリメータの有無による定量性向上効果を評価した。

4 - 5 データ処理方法

定量的中性子ラジオグラフィー :

まず、測定された一次元のラジオグラフィー像は、各フォトダイオードの電荷に対応した電圧値の分布である。このデータはコンバータ光による成分にフォトダイオードの暗出力による成分が加算されたものである。そしてこのデータには暗出力とともに、中性子に関するシェーディングと総称される歪みを持っている。この素データから中性子量を定量的に得るためにこれらを補正しなければならない。まず、暗出力は加算的であるために得られたデータから予め測定しておいた暗出力データを差し引けばよい。一方シェーディングデータによる歪みはコンバータの発光ムラ、P C D 単位素子間の感度のばらつき、中性子ビームの不均一性、レンズ系による収差、ハニカムコリメータによる影などであり乗法的に加わっている。これを補正するにはまず、被写体なしで中性子ビームを照射した出力分布をバックグランドデータとする。バックグランドデータは理想的にはフラットな分布が得られるはずであるが、上で述べた種々の歪みやノイズなどの因子の影響により実際には F i g . 1 2 の左図に示す"バックグランド"の様になっている。また暗電流を差し引く必要がある。

実際に測定された被写体（鉄のステップが例になっている）データ（撮像データ）を補正するには次の式で行った。

$$I_c = (I_p - I_d) / (I_b - I_d)$$

ここで I_c は補正されたデータで、 I_p は撮像データで、 I_b はバックグランドデータで、 I_d は暗電流データである。結果としては F i g . 1 2 の右側の図が得られた。

この図から明かなようにハニカムの影響は補正処理により完全といえるほど消去され、きれいなステップ状の画像データになる。このステップ像から分解能としては 0.75 mm 程度であると

評価される。これは現システムでは特にコンバータとレンズ系との光学系配置で決まる。

この中性子ラジオグラフィー像のデータから、中性子減衰率を求めて、中性子減衰率と被写体の厚さの関係をグラフにプロットし、そのグラフの勾配によりその物体の中性子全断面積を求める。

中性子CT:

CTの場合、撮影された投影データは再構成のため名古屋大学大型計算機センター(FACOM M-1800/20)に入力される。再構成アルゴリズムにコンボリューション法を用い、そのフィルタ関数としてはShepp and Loganの関数を使用した。再構成後のCT像は本センターの画像フォーマットであるSIDBA形成にするための8ビット(256階調)の整数値に変換した。SIDBA形式に変換されたCT像は名古屋大学大型計算センターのVarsatec静電式ドットプリンターまたはFIVIS(Fujitsu Integrated Visual Information System)に出力する。

5. 結果と考察

5-1 PCD素子の暗電流温度特性

PCDの暗電流による飽和時間の温度特性をFig. 13に示した。この測定温度範囲では飽和時間と使用温度の間に良い指数関数の関係にある。冷却した場合は飽和時間が長く、撮像時間が長くされることになる。冷却しない場合は飽和時間が短く、例えば室温が25°Cの場合、10秒程度で飽和してしまうことになる。本研究では-22°Cで実験を行うことにした。

5-2 PCD素子の感度曲線

測定されたデータ(暗出力データとバックグランドデータ)から、感度曲線を求めることができる。PCD冷却なしの場合の測定されたデータから撮像照射時間とPCD出力の関係を求め、それはFig. 14に示す。PCDを-22°Cに冷却した場合の測定されたデータから撮像照射時間とPCD出力の関係を求めた。それはFig. 15に示す。ともに極めて良い直線関係にある。それぞれを式で表すと次のようになる。

ハニカム有り、

$$V = 0.05 I^{1.003 \pm -0.015}$$

ハニカム無し、

$$V = 0.07 I^{1.001 \pm -0.018}$$

ただし V : P C D 出力

I : 撮像照射時間 (すなわち中性子量)

このことから P C D 出力を中性子量とは厳密に等価として扱ってよいことがわかる。つまり、P C D 出力を中性子へ換算する必要がない。これは厳密なデータ解析にはこの変換が必要なフィルム法や T V 法と比較して決定的な利点である。

F i g . 1 5 において G d ハニカムコリメータを設置した場合は感度曲線が G d ハニカムコリメータを設置しない場合と比べると高照射側にシフトしている。ハニカムによりある割合の中性子ビームが吸収され損失するからである。

この直線関係の範囲からダイナミックレンジを評価すると、本研究の実験システム全体では 504 となり、従来のフィルム法やテレビ法が 100 以下であるのに比べて高精度の画像データを得ることが出来る。

5 - 3 ステップウェッジ画像データ処理結果

厚さが階段状に変わる被写体 (ステップウェッジ) を撮影して、その被写体の厚さと中性子減衰率の関係を求める。その関係は検出された中性子が純粹透過成分であるなら指数関係になり、そこから中性子全断面積 (減衰係数) を得る。

鉄ステップウェッジを例に種々の実験条件組み合せの下での像素データとその補正処理データを F i g . 1 6 a から g に示す。冷却なしでは暗電流の項が大きいが冷却によりそれがきわめて低くなっていることがわかる。

被写体とコンバータとの密着の場合は補正した画像データが歪んでいるのがわかる。これがいわゆる散乱中性子の影響である。1 cm の距離をおくとその影響が少しうする。10 cm 離すと見かけ上はほぼ影響が無くなったと思われる。さらにハニカムを用いた場合の像素データではハニカム格子の影響でノイズが多い素データになっているが、補正処理を行うことにより鉄ステップの画像はほぼ完全な形になっている。これらを用いて減衰率を評価する。他の被写体ステップについても同様な画像データを得て、それぞれ補正処理をした。

5 - 4 各種方法による減衰係数の比較評価

本研究で撮影したステップウェッジは鉄、鉛、銅、黒鉛とニッケルである。各ステップウェッジについて種々の実験条件下で得られた中性子減衰率と厚さの関係を以下に示す。

P C D 冷却なしの場合 :

冷却しない場合に得られた各種材料の中性子減衰率と被写体厚さの関係の結果をFig. 17から19に示す。ハニカムコリメータを設置した場合とハニカムコリメータを設置しない場合（被写体とコンバータの間の距離を密着、1 cm、10 cmと変えた場合）の各々の中性子減衰曲線を示した。距離をとることの効果が現れているのがよくわかる。さらに測定結果からハニカムコリメータを用いた場合の方が、ハニカムコリメータなしの場合（密着、1 cm、10 cm）と比べ、直線の勾配が大きく、中性子の減衰の仕方が著しいことが分かる。この減衰の差が、散乱中性子の影響を除去した程度の差によるものである。すなわち、ハニカムコリメータなし（密着）の場合は、冷却型PCDには散乱中性子も検出されてしまう。しかしながら、ハニカムコリメータありの場合は、被写体の内部及び照射場で散乱された中性子はハニカムコリメータにより吸収され、コンバータに到達せず、冷却型PCDに検出されることはない。その結果ハニカムコリメータありの場合の方が、中性子の減衰の仕方が著しいような形になっている。このことは、ステップウェッジの同じ厚さにおける中性子減衰量の差が、ハニカムコリメータにより吸収された散乱中性子の量を表しているといえる。減衰曲線の勾配から被写体の巨視的断面積を求めることができる。ステップウェッジの巨視的断面積の結果をTable 3に示す。中性子減衰率と巨視的断面積の関係をFig. 20に示す。鉄の巨視的断面積の結果からみると、ハニカムコリメータありの場合は $1.020 \pm 0.049(\text{cm}^{-1})$ 、ハニカムコリメータなしの場合には $0.993 \pm 0.040(\text{cm}^{-1})$ である。鉄の巨視的断面積の文献値は $1.15(\text{cm}^{-1})$ である[9]。文献と比較してみれば、ハニカムコリメータありの場合の方がより文献値に近くなっていること、散乱線除去効果が有効に働いていることを示している。

PCD冷却ありの場合：

PCD素子を -22°C に冷却した場合の中性子減衰率と各種の被写体の厚さとの関係の結果をFig. 21から25に示す。ハニカムコリメータを設置した場合とハニカムコリメータを設置しない場合（被写体コンバータ間距離、密着、1 cm、10 cm）、各々の中性子減衰曲線の測定結果を示した。ハニカムコリメータありの方が、ハニカムコリメータなしの場合（密着、1 cm、10 cm）と比べ、各曲線の勾配が急であり、中性子減衰の仕方が著しいことが分かる。減衰曲線から被写体の巨視的断面積を求めることができる。各材料の巨視的断面積の結果をTable 4に示す。鉄の巨視的断面積の結果からみると、ハニカムコリメータありの場合のはうは $1.050 \pm 0.028(\text{cm}^{-1})$ 、ハニカムコリメータなしの場合は $1.014 \pm 0.015(\text{cm}^{-1})$ である。鉄の巨視的断面積の文献値は $1.15(\text{cm}^{-1})$ である。文献[9]と比較してみれば、ハニカムコリメータありの場合の方がより文献値により近くなっている。中性子減衰率と巨視的断面積の関係をまとめたものをFig. 26に示す。

以上をまとめて比較すると、文献値とハニカムコリメータあり（冷却なし）の場合との値に、 0.13cm^{-1} 程度、ハニカムコリメータあり（冷却あり）の場合との値に 0.1cm^{-1} 程度の開きがある。技術的にはハニカムコリメータの（L/D）比がもっと高く、中性子吸収率の高いハニカ

ムコリメータを用いれば、より一致度が高められるものと思われる。また、検討を進めているところであるが、まず用いている中性子ビームのエネルギースペクトルの効果について評価する必要がある。また、本論文では触れないが γ 線の影響を評価することも極めて重要であることだけ指摘しておく。

5 - 5 CTへの応用例

中性子CTの結果として Table 5 と Fig. 27 に CT再構成画像から計算される CT 値と断面積の関係を示す。CT 値と断面積の関係は Gd ハニカムコリメータを設置する場合と Gd ハニカムコリメータを設置しない場合を比較している。この関係は理論的には直線関係を示すはずである。ハニカムコリメータを設置した場合がハニカムコリメータを設置しない場合の方より良好な直線関係にあると見ることが出来る。これはハニカムコリメータが散乱中性子を除去している効果である。散乱中性子除去率をあげるほか、中性子エネルギースペクトルの効果、 γ 線被りの影響も評価できるようにすることによって、さらに定量性の向上が図れるであろう。

6. 結論

従来の中性子ラジオグラフィーの撮像方法としては主に TV 法とフィルム法があげられる。これらの中性子ラジオグラフィー用デバイスはダイナミックレンジが小さく、定量的評価を行うには限界があった。本研究では冷却型 PCD リニアイメージセンサを画像検出器とする定量的中性子ラジオグラフィの基礎研究を行い、かつその応用の 1 例として中性子 CT 再構成像を得ることを目的とした。また、散乱中性子を除去するために、被写体の後ろに Gd ハニカムコリメータを設置してラジオグラフィー撮像実験を行い、かつ CT 再構成用撮像を行い、解析した。得られた結論をまとめると以下の様になる。

1. 冷却型 PCD リニアイメージセンサを用いて NR 撮像実験を行った結果、冷却型 PCD リニアイメージセンサのダイナミックレンジが広い（5 倍程度）という特徴を生かした画像が得られることを明らかにできた。
2. Gd ハニカムコリメータを被写体と画像検出器との間に設置することによって、散乱中性子を除去し、定量的データを取得することができる。これを冷却型 PCD リニアイメージセンサと組み合わせた中性子ラジオグラフィーシステムに適用することにより定量性を向上させることができた。被写体物質の減衰率および CT 値と中性子巨視的断面積との定量的関係を顕著に改善することが出来た。

3. このシステムを中性子CTに応用することにより定量性のある再構成像を得ることができた。

今後の課題としては、定量性向上に伴って明らかになった中性子エネルギースペクトルの効果の評価法及び γ 線バックグラウンドの影響を除去する方法を検討し、より定量性を向上させ、科学的研究の新しい解析技術として確立することである。

謝辞

本実験は協力研究の形で日本原子力研究所のJRR-3M熱中性子ラジオグラフィー施設を利用させていただきました。実験を進める当りいろいろご支援を頂きました放射線照射振興協会安藤均氏に深く感謝申し上げます。

参考文献 :

- (1). 安藤 敦久、「半導体受光素子を用いた中性子CTの開発」、
名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻、修士論文、1990年
- (2). Y. Ikeda, A. Ando, K. Ohkubo, M. Yokoi, H. Kobayashi
"A New Imaging Device for Neutron CT", (WCNR-III, OSAKA, 1989)
- (3). 取扱い説明書、「C2890 データ処理ユニット(Data Processing Unit)」、
(浜松ホトニクス株式会社)、1992
- (4). 取扱説明書、「ペルチェ素子」、Marlow Industries, Inc. 1993
- (5). H. Kobayashi et al. 「Macroscopic Cross Section Measurements and Defect
Detection in Materials Using Neutron Radiography Technique」,
Proc. The 1st JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering,
Vol. 1, pp649-654, Tokyo, 1991
- (6). 小笠原 淳二、「ガドリニウム被覆ハニカムコリメータを用いた定量的な中性子ラジオ
グラフィーの基礎実験」、名古屋大学工学部原子核工学科、卒業論文、1991年

- (7). M.Tamaki, J.Ogasawara, Budi Santoso, K.Ohkubo, K.Tasaka, S.Fujine,
K.Yoneda, A.Tsuruno, M.Matsubayashi
"Basic Research on Quantitative Neutron Radiography using Neutron
Absorbing Honeycomb Collimator", WCNR-IV, SAN FRANCISCO, 1992
- (8). 一色正彦、高橋秀武、市川博喜、白井英次「JRR-3改造炉の特性」、
日本原子力学会誌、Vol.34、No.2、1992年
- (9). J.R.Lamarche, "Introduction to Nuclear Engineering . 2nd Edition".

Table 1 Specifications of Gd-coated honeycomb collimator

外形寸法	300mm W x 300mm H x 100mm L
単位ハニカム寸法	3mm D x 100mm L
ハニカム材質	アルミニウム 0.033mm T
中性子吸収体	酸化ガドリニウム両面被覆0.1mm T
(L/D) 比	33

Table 2 Specifications of JRR-3M TNRF-2 facility

日本原子力研究所(JAERI-JRR-3M/TNRF-2)	
炉／出力	J R R - 3 M / 20 [MW]
中性子束	1.5×10^8 [n/cm ² s]
カドミウム比	130
中性子／ガンマ線比	62.5 [n/cm ² μSv]
コリメータ長	7277 [mm]
コリメータ開口部	41 [mm]
L / D 比*)	165
照射野 (W x H)	255 x 305 [mm]
試料の最大寸法 (W x H x t)	400 x 400 x 500 [mm]
試料の最大重量	50 [kg]
蛍光コンバータ	⁶ L i F - Z n S (A g) 系

*)中性子ラジオグラフィーにより測定された中性子ビームの値。

Table 3 Neutron attenuation coefficient by various NR measurements
without PCD cooling

冷却なし

試料	Gdハニカムあり (10 cm)	Gdハニカムなし (10 cm)	Gdハニカムなし (1 cm)	Gdハニカムなし (0 cm)	文献値
F c	(1.020 ± 0.049)	(0.993 ± 0.040)	-	(0.657 ± 0.020)	1.15
P b	(0.323 ± 0.005)	(0.284 ± 0.005)	-	(0.182 ± 0.004)	0.369
C	(0.382 ± 0.003)	(0.363 ± 0.003)	(0.278 ± 0.013)	(0.232 ± 0.010)	0.385

Table 4 Neutron attenuation coefficient by various NR measurements
with PCD cooling at -22°C

冷却あり

試料	Gdハニカムあり (10 cm)	Gdハニカムなし (10 cm)	Gdハニカムなし (1 cm)	Gdハニカムなし (0 cm)	文献値
F c	(1.050 ± 0.028)	(1.014 ± 0.015)	(0.768 ± 0.106)	(0.659 ± 0.053)	1.15
C u	(0.882 ± 0.011)	(0.813 ± 0.024)	(0.727 ± 0.059)	(0.653 ± 0.010)	0.99
P b	(0.311 ± 0.020)	(0.284 ± 0.011)	(0.242 ± 0.006)	(0.231 ± 0.010)	0.369
C	(0.382 ± 0.003)	(0.369 ± 0.005)	(0.301 ± 0.027)	(0.251 ± 0.007)	0.385
N i	(1.851 ± 0.104)	(1.847 ± 0.061)	(1.733 ± 0.111)	(1.733 ± 0.092)	1.98

Table 5 Computed tomography(CT) value by with and without honeycomb collimator
at -22 C cooling of PCD device

物質	G d ハニカムあり (10 cm)	G d ハニカムなし (10 cm)	参考値
A l	(0.090 ± 0.015)	(0.089 ± 0.030)	0.10
P b	(0.342 ± 0.027)	(0.309 ± 0.046)	0.369
T i	(0.511 ± 0.053)	(0.494 ± 0.024)	0.57
B S	(0.616 ± 0.054)	(0.589 ± 0.035)	0.74
C u	(0.832 ± 0.050)	(0.759 ± 0.041)	0.99
S U S	(0.974 ± 0.020)	(0.896 ± 0.051)	1.14
F e	(1.049 ± 0.030)	(0.954 ± 0.044)	1.15
N i	(1.772 ± 0.029)	(1.561 ± 0.032)	1.98

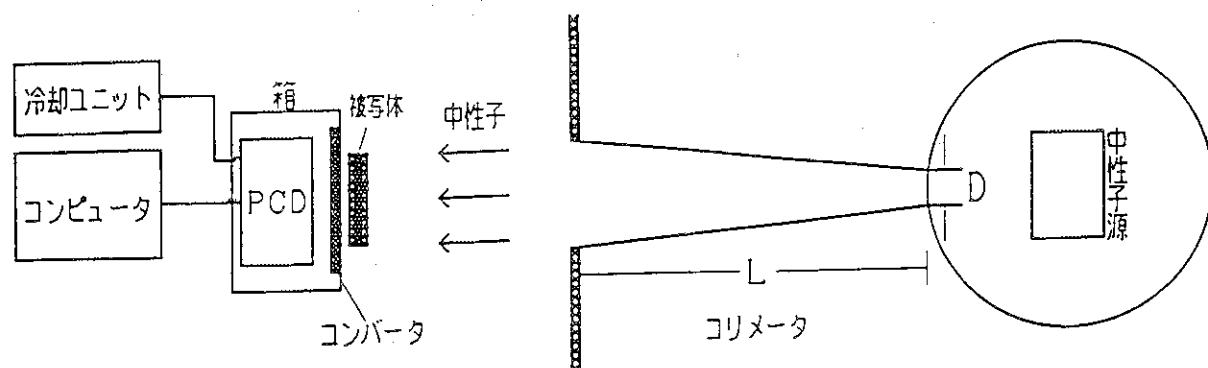


Fig.1 Basic setup of neutron radiography system

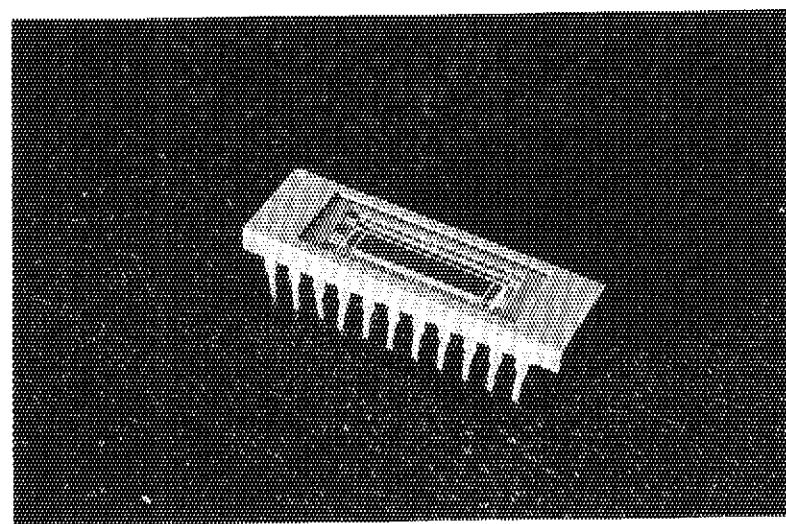


Fig.2 Photo of PCD device

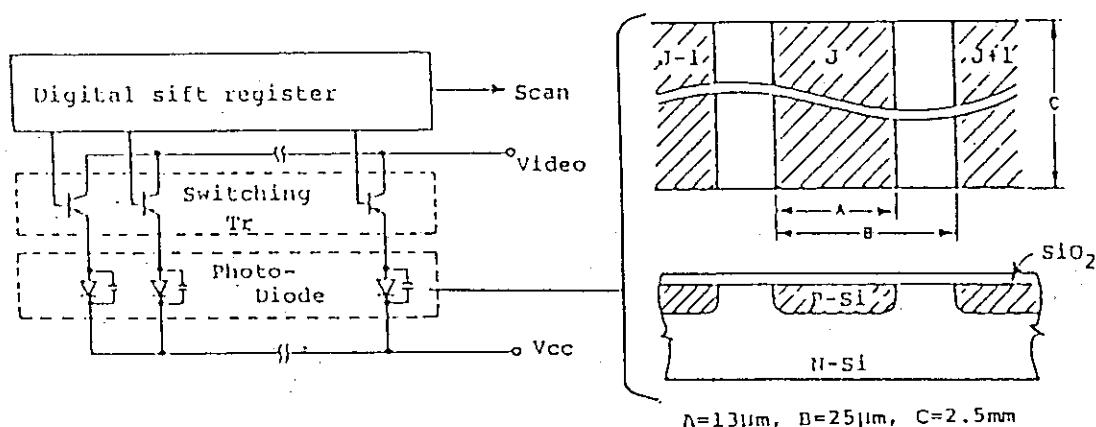


Fig. 3 Electronics of PCD device

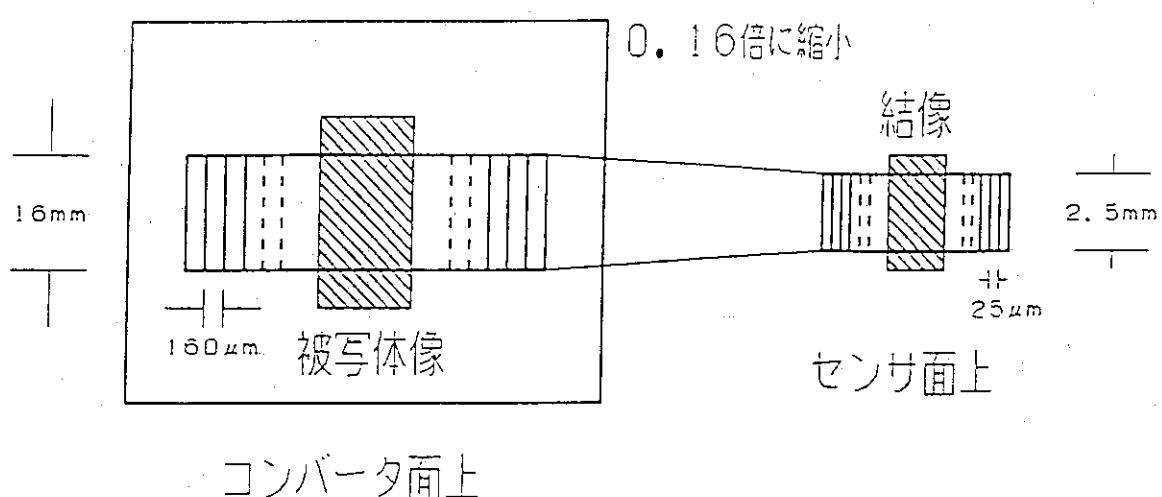


Fig. 4 Geometrical configuration of image on converter and PCD element

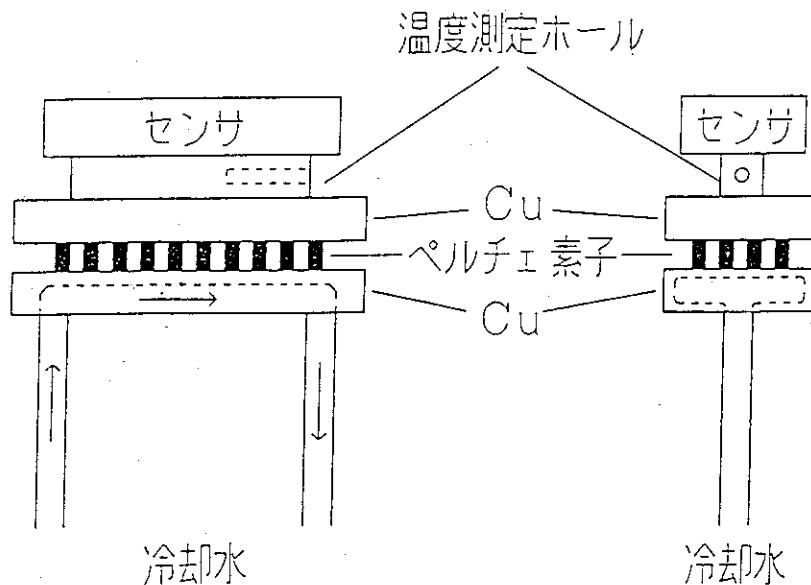


Fig.5 PCD cooling system

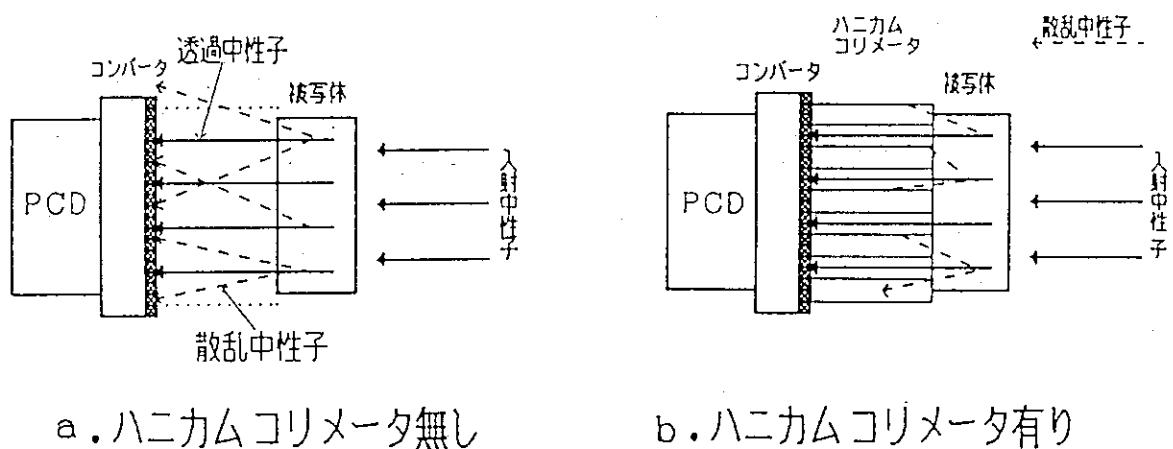


Fig.6 Elimination of scattered neutron by honeycomb collimator

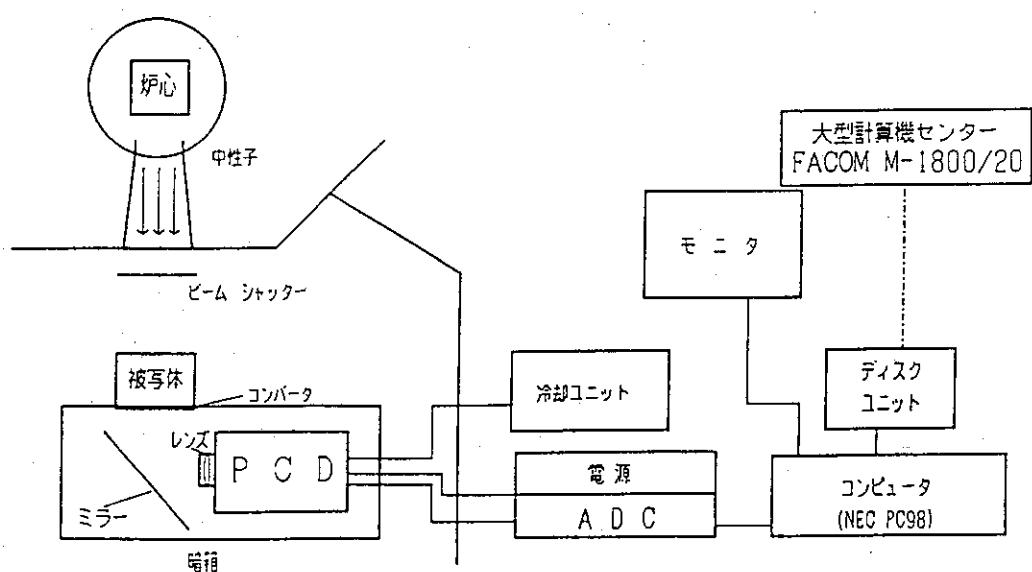


Fig. 7 PCD NR device setup

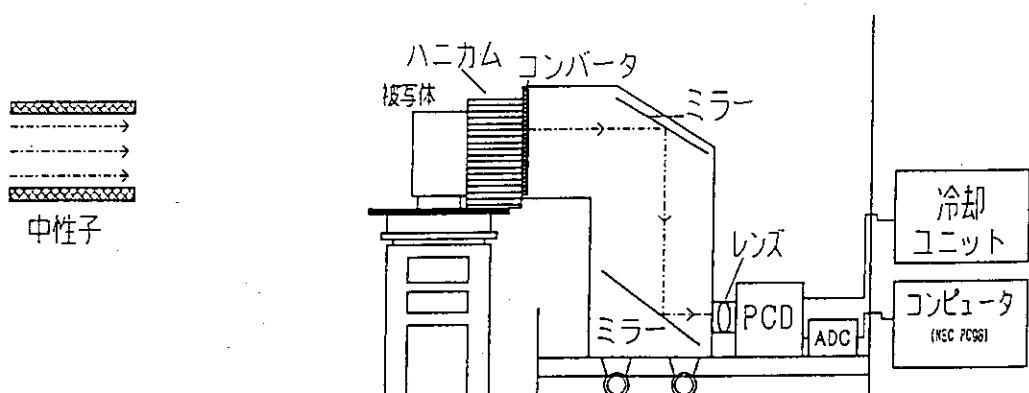


Fig. 8 TNRF-2 NR facility with PCD system

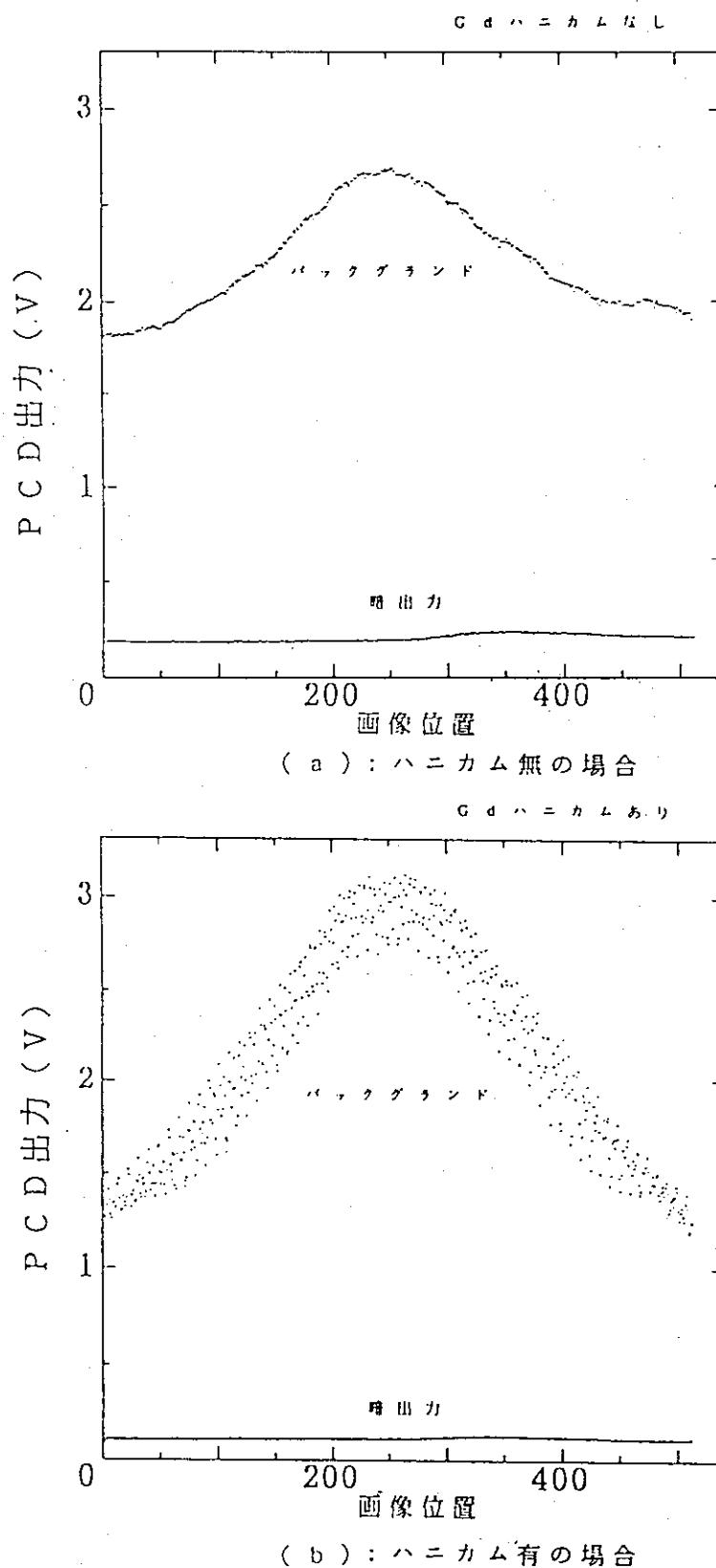


Fig. 9. PCD output of TNRF-2 original neutron beam
with and without honeycomb collimator

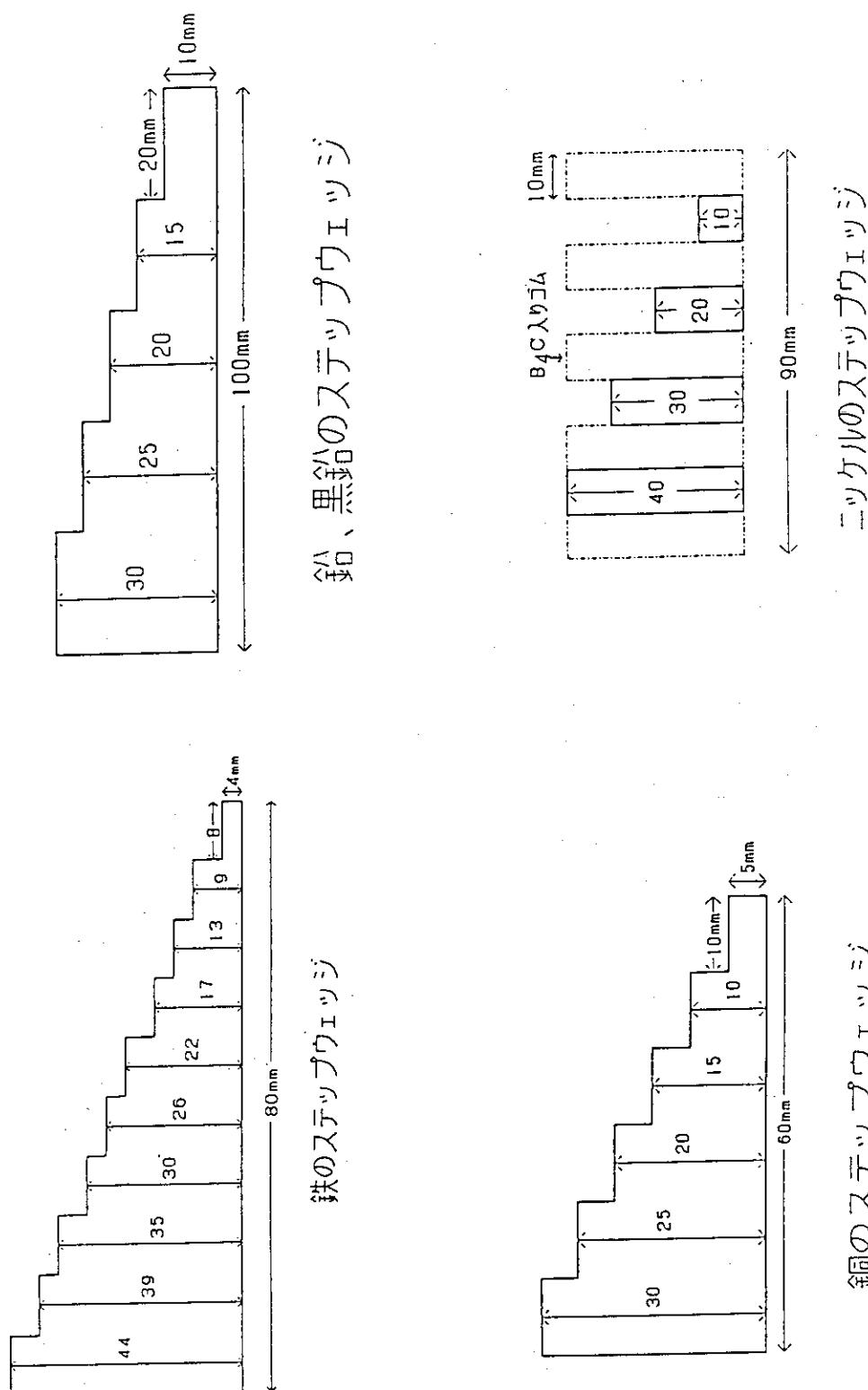


Fig. 10 Dimensions of stepwedges

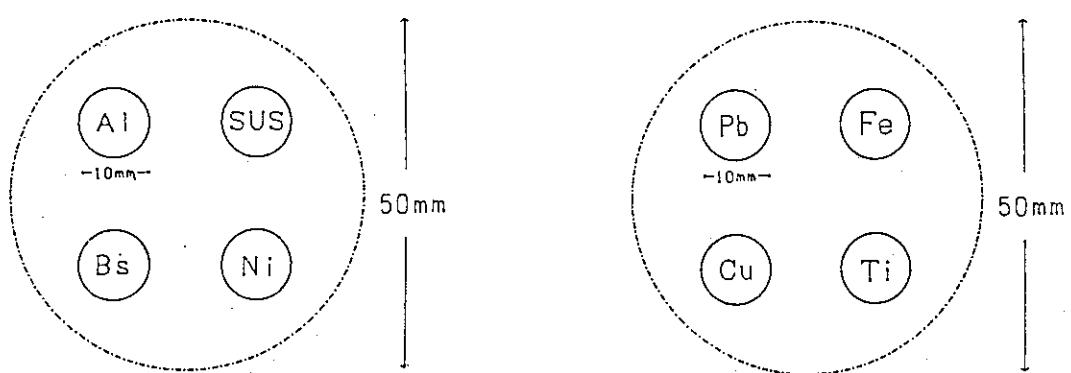


Fig. 11 Configurations of cylindrical samples for computed tomography

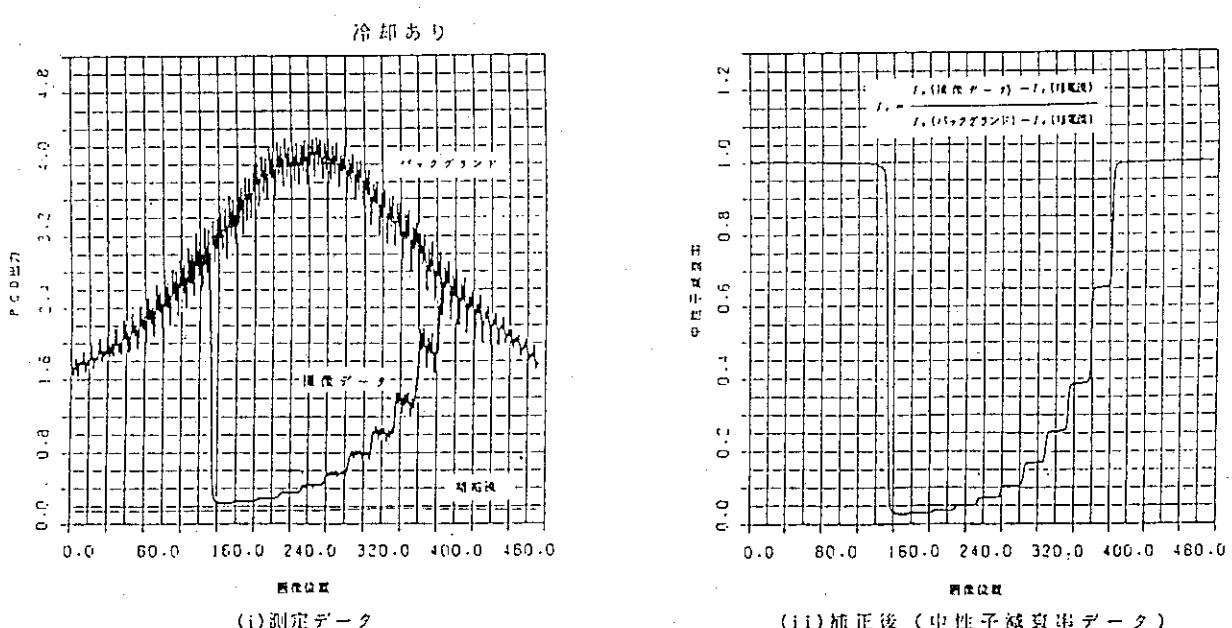


Fig. 12 Typical data set of iron(Fe) stepwedge
(PCD output and calibrated neutron attenuation ratio)

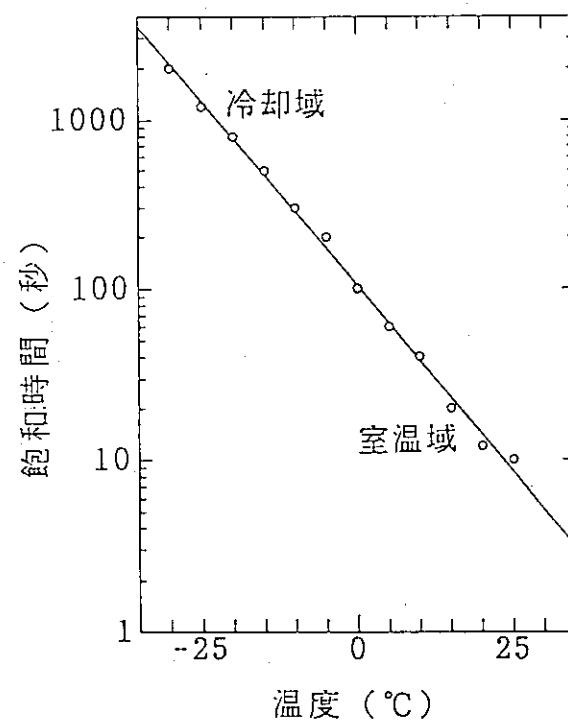


Fig. 13 Temperature dependence of saturation time
of PCD element by dark current

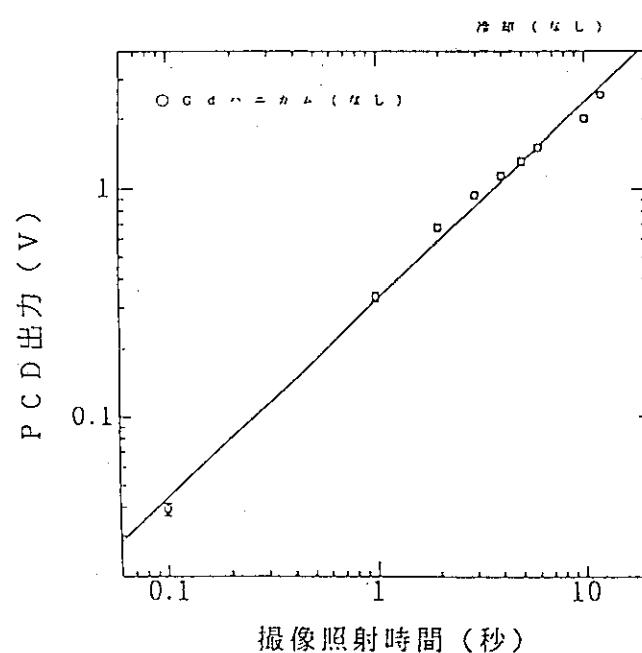


Fig. 14 Sensitivity curve of PCD device without cooling in JRR-3M TNRF-2
(PCD output vs. exposure time)

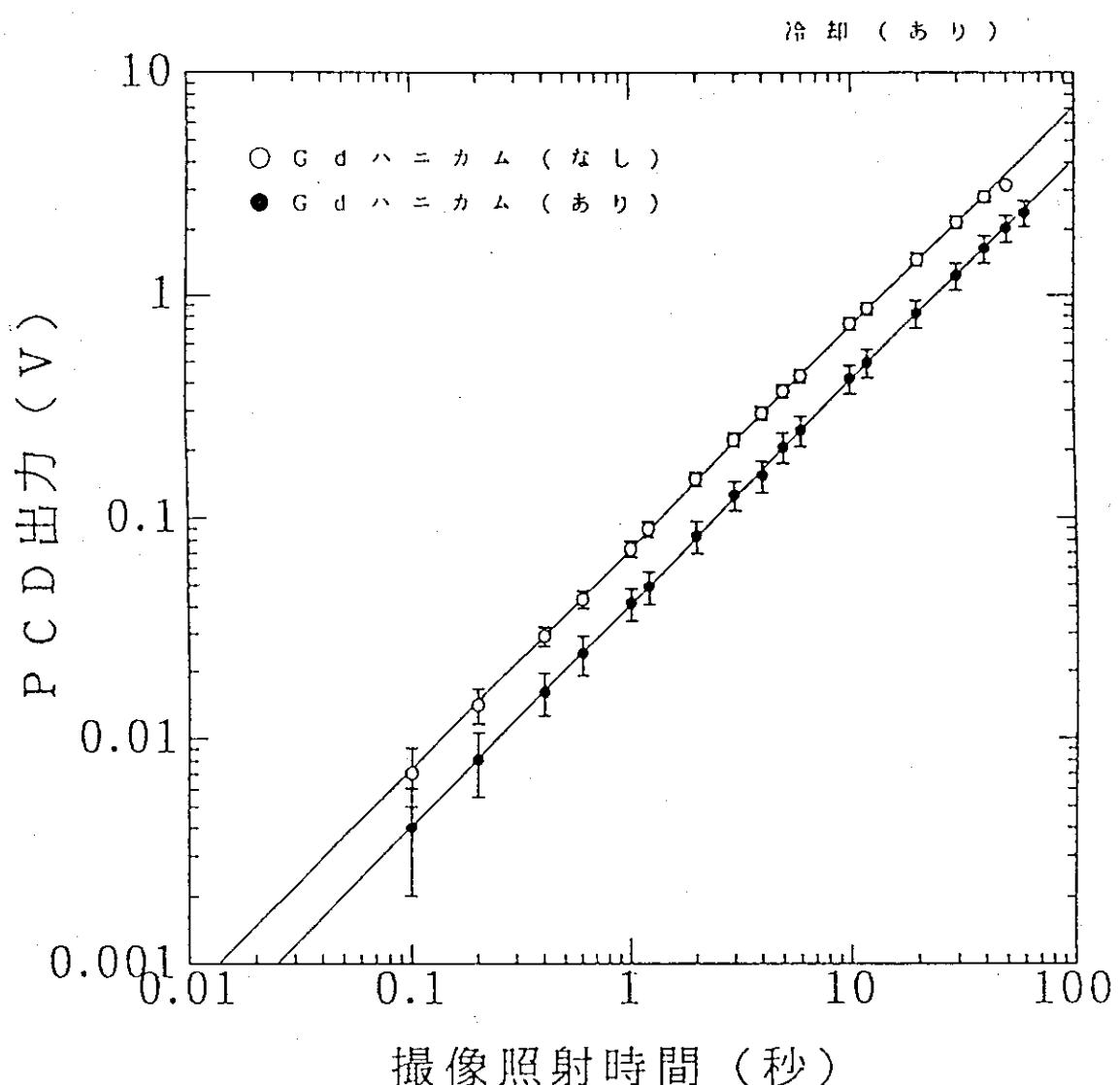


Fig. 15 Sensitivity curves of PCD device at -22°C in JRR-3M TNRF-2
with and without honeycomb collimator

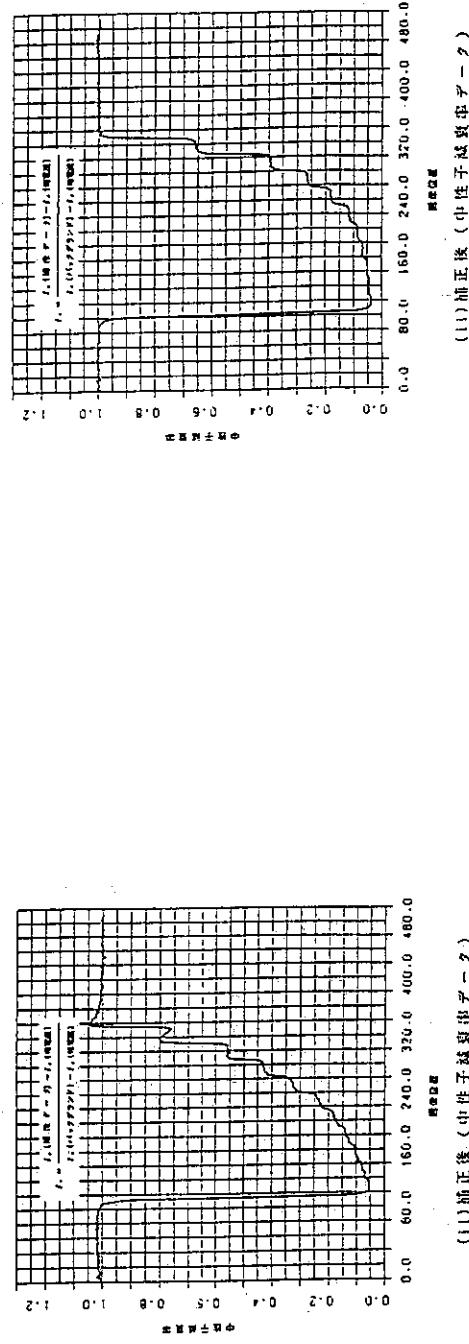
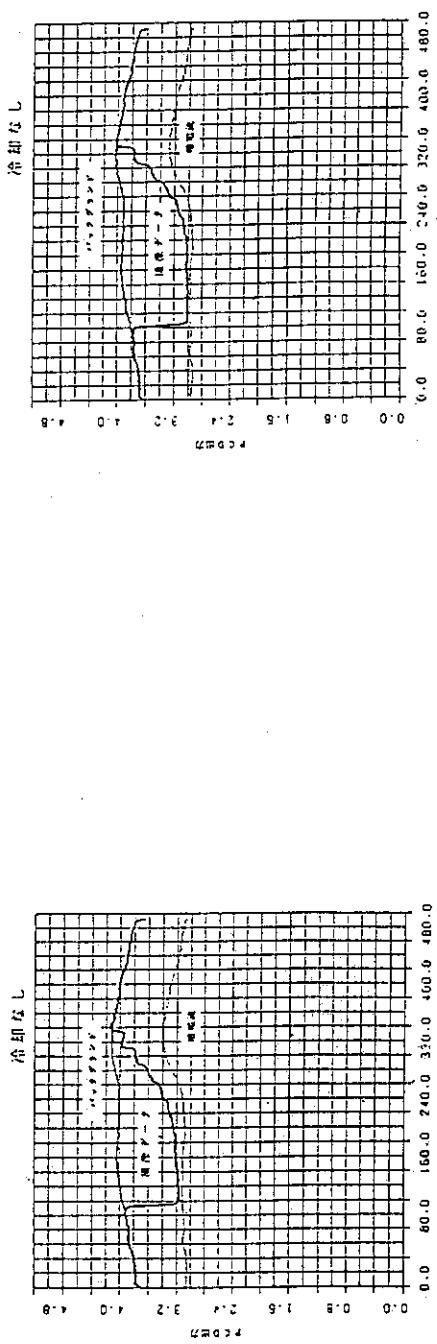


Fig.16 a PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge without cooling (without Gd-honeycomb collimator/direct contact)

Fig.16 b PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge without cooling (without Gd-honeycomb collimator/10cm departure)



Fig. 16 c PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge without cooling (with Gd-honeycomb collimator/10cm departure)

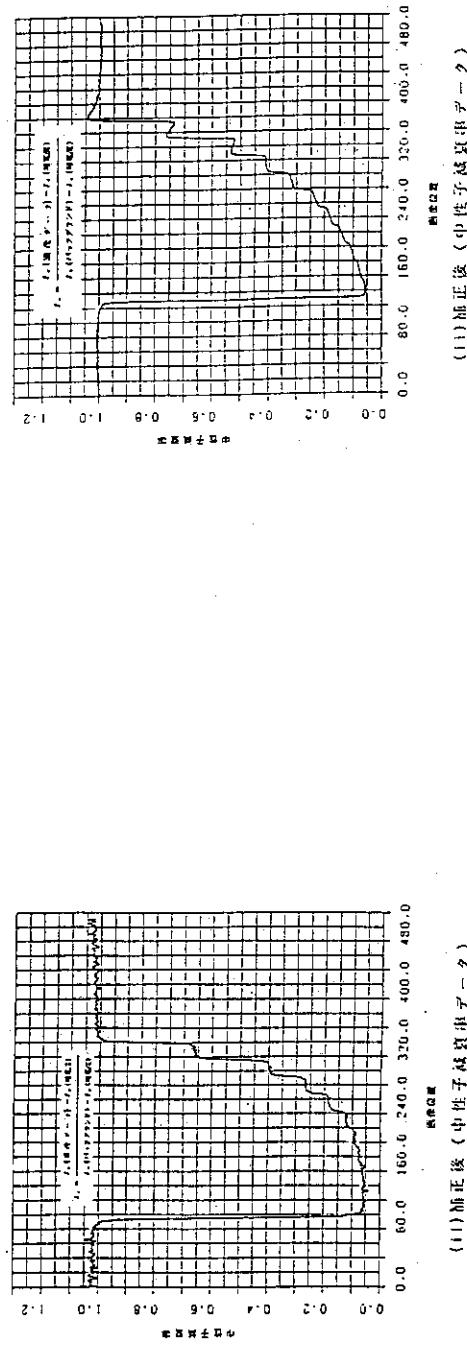


Fig. 16 d PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge at -22°C cooling (without Gd-honeycomb collimator/direct contact)

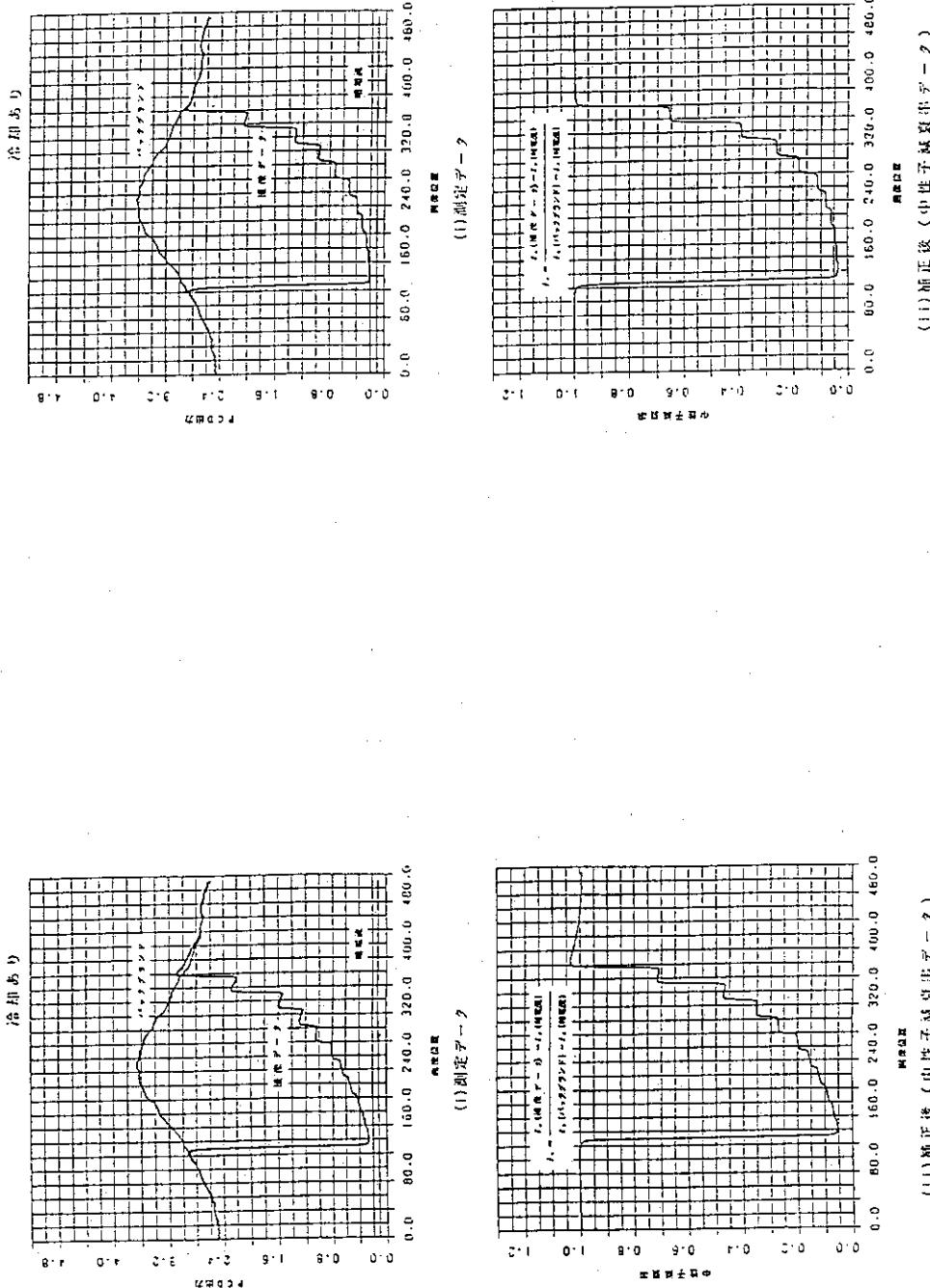


Fig.16 e PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge
at -22°C cooling (without Gd-honeycomb collimator/1cm departure)

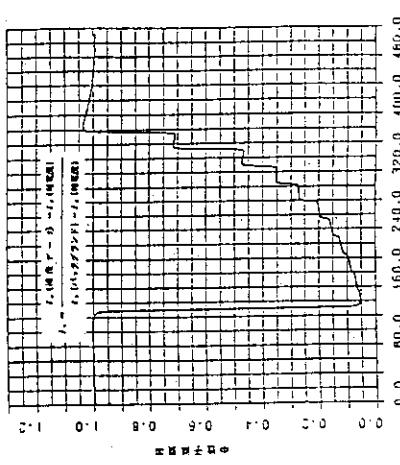
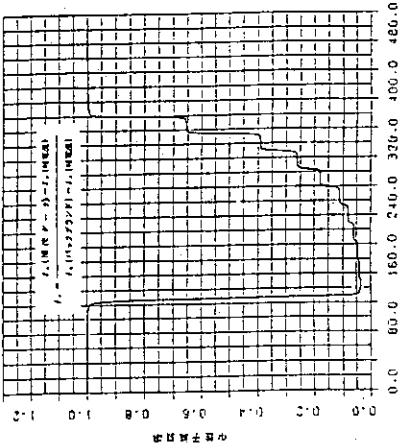
Fig.16 f PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge
at -22°C cooling (without Gd-honeycomb collimator/10cm departure)

(i) 錫正弦 (中性子エネルギー - →)

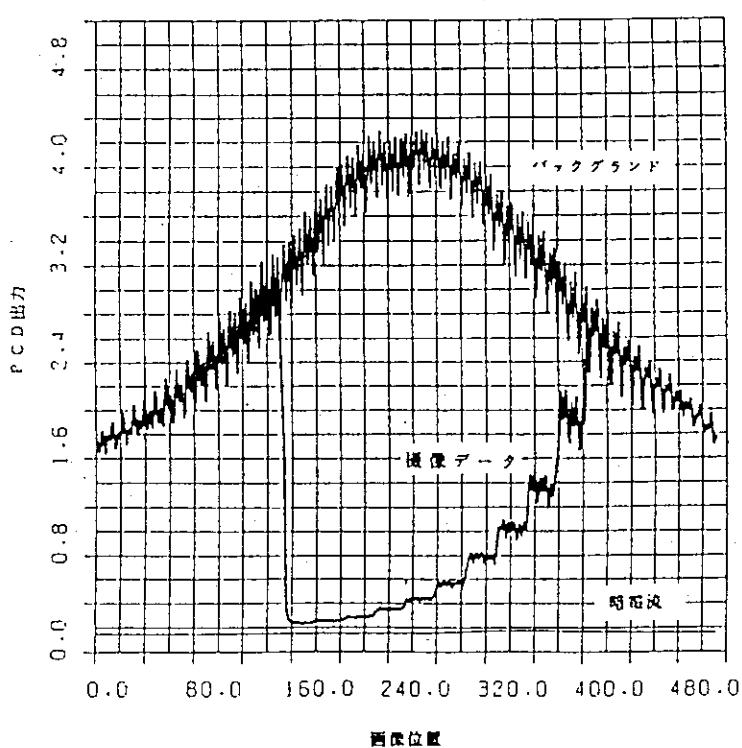
(ii) 鋼正弦 (中性子エネルギー - →)

0.0 60.0 120.0 180.0 240.0 300.0 360.0 420.0 480.0

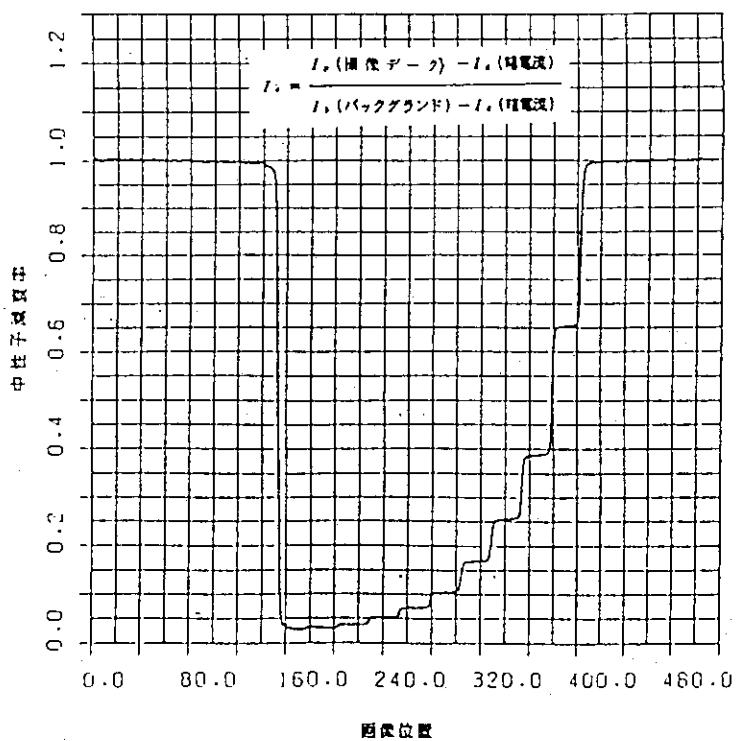
0.0 60.0 120.0 180.0 240.0 300.0 360.0 420.0 480.0



冷却あり



(i)測定データ



(ii)補正後（中性子減衰率データ）

Fig.16 g PCD output and attenuation ratio of iron(Fe) stepwedge
at -22°C cooling (with Gd-honeycomb collimator/10cm departure)

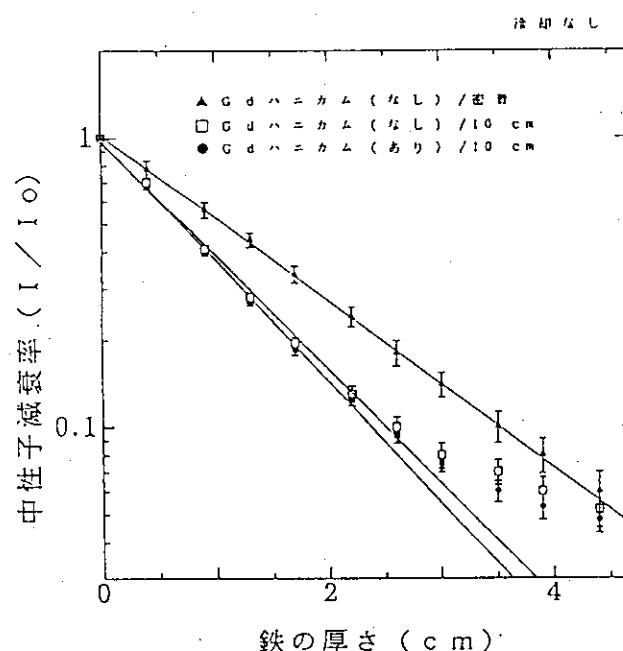


Fig.17 Thickness dependence of neutron attenuation of iron(Fe) without PCD cooling

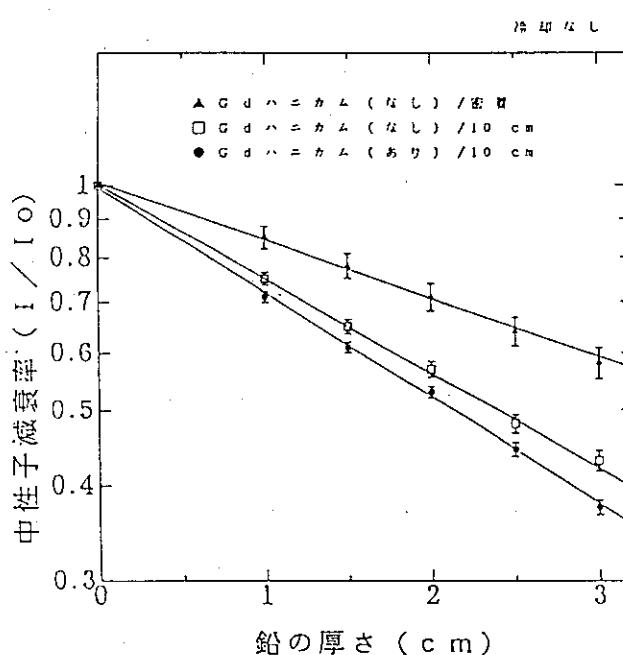


Fig.18 Thickness dependence of neutron attenuation of lead(Pb) without PCD cooling

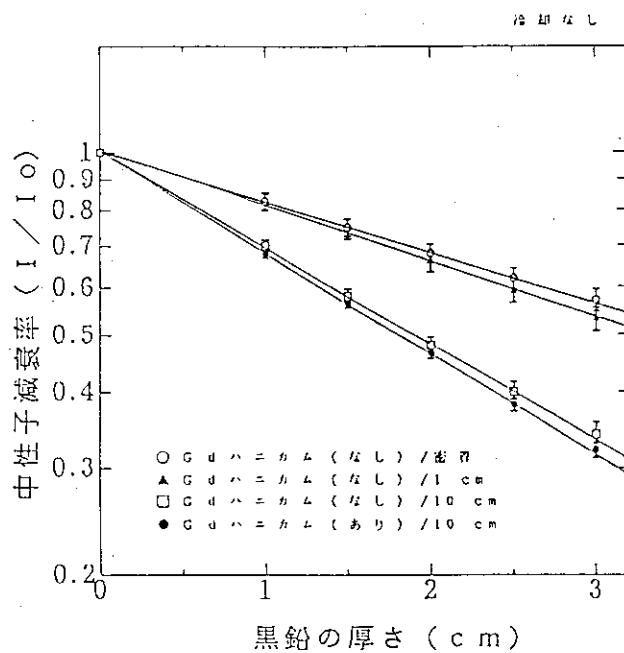


Fig. 19 Thickness dependence of neutron attenuation
of graphite(C) without PCD cooling

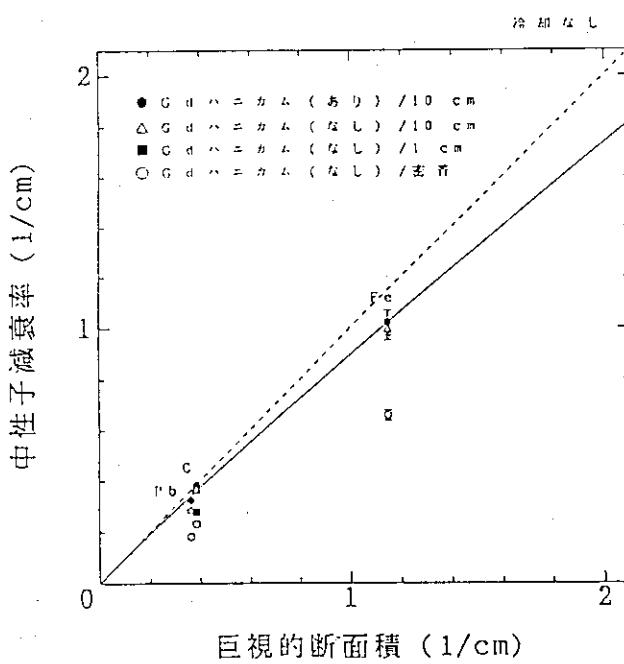


Fig. 20 Correlation between neutron attenuation coefficient and
macroscopic cross section without PCD cooling

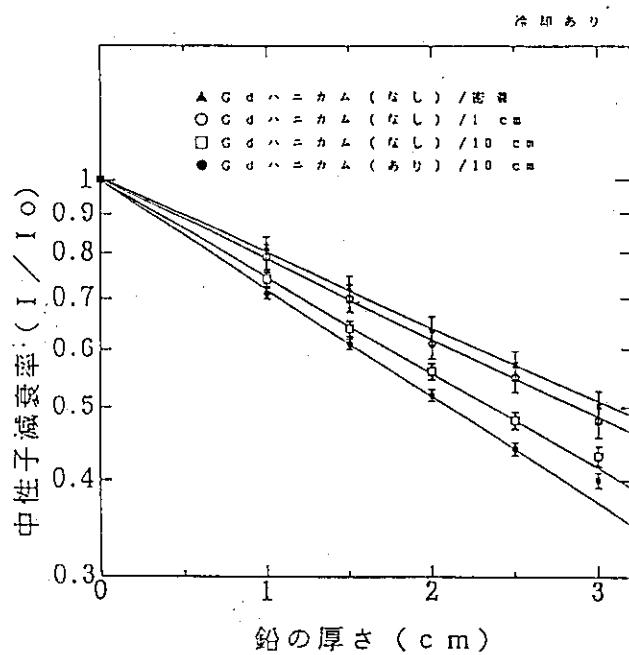


Fig. 23 Thickness dependence of neutron attenuation of lead(Pb) with PCD cooling at -22°C

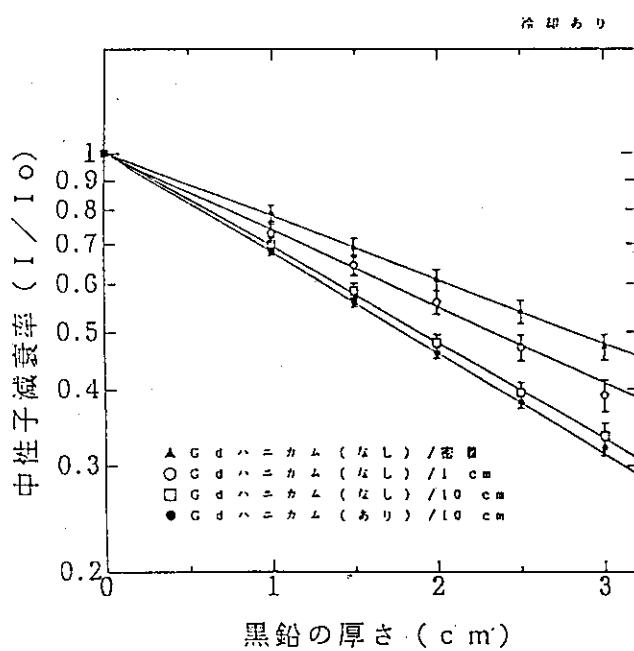


Fig. 24 Thickness dependence of neutron attenuation of graphite(C) with PCD cooling at -22°C

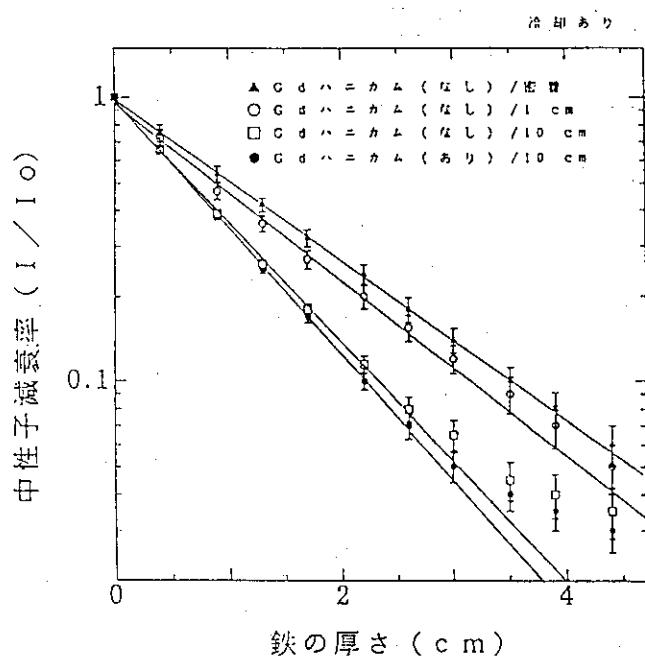


Fig. 21 Thickness dependence of neutron attenuation
of iron(Fe) with PCD cooling at -22°C

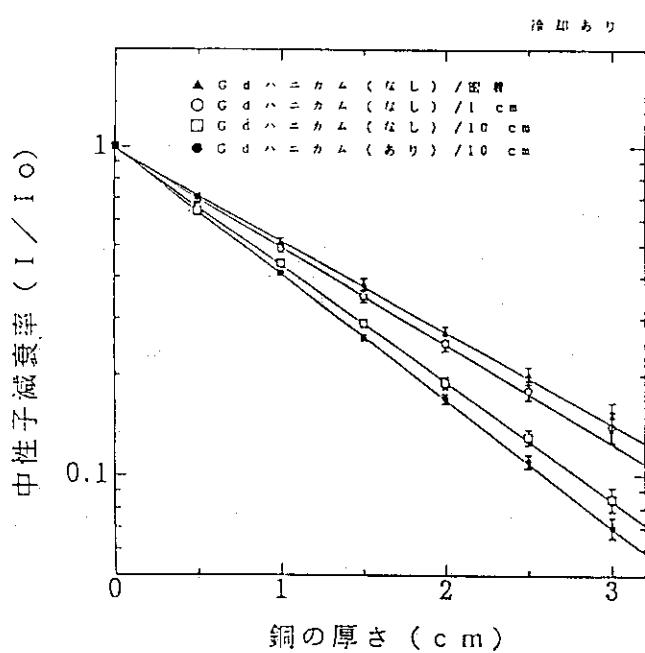


Fig. 22 Thickness dependence of neutron attenuation
of copper(Cu) with PCD cooling at -22°C

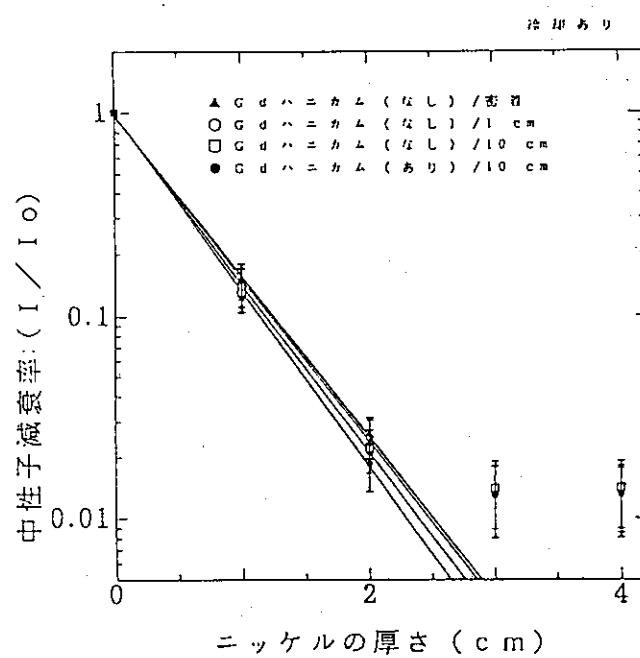


Fig. 25 Thickness dependence of neutron attenuation
of nickel(Ni) with PCD cooling at -22°C

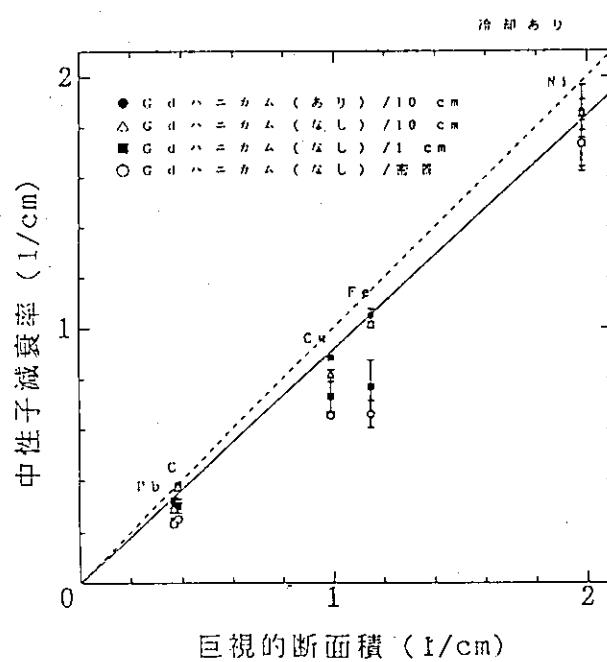


Fig. 26 Correlation between neutron attenuation coefficient and
macroscopic cross section with PCD cooling at -22°C

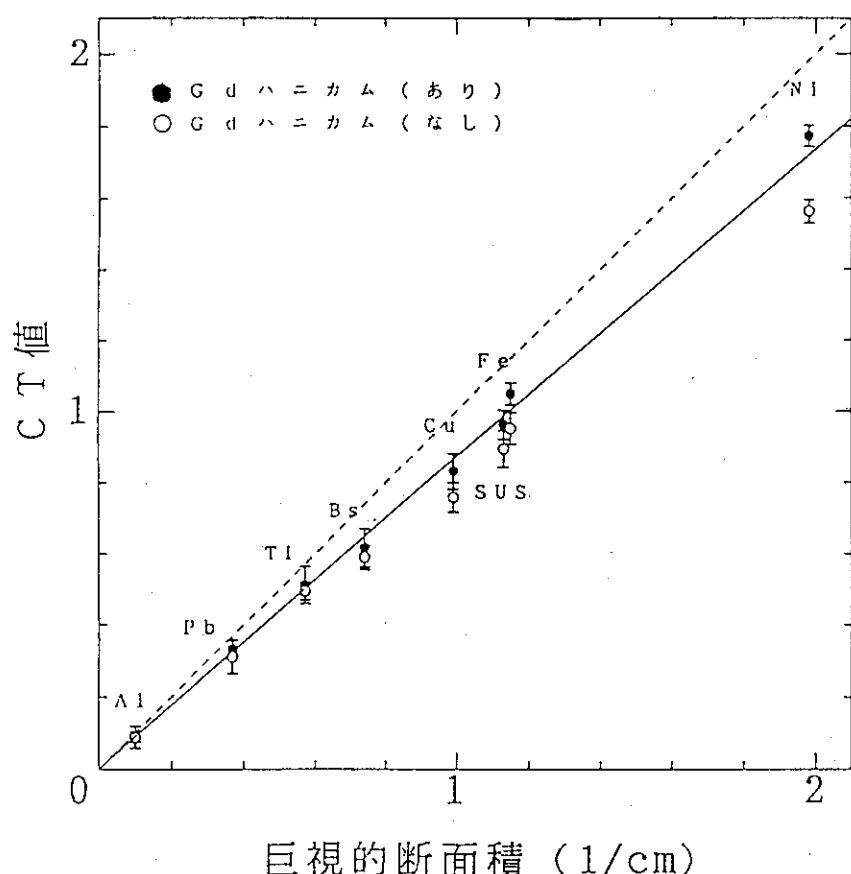


Fig. 27 Correlation between computed tomography(CT) value and macroscopic cross section with and without honeycomb collimator at -22°C cooling of PCD device

3.2 冷中性子ビームによるラジオグラフィの基礎研究

小田 将広、玉置 昌義、田坂 完二

名古屋大学 工学部

1. 緒言

中性子ラジオグラフィーは中性子の発見とともに、その透過力が大きいことから、その応用として始まった。より高品位、高画質の画像を求めた結果、現在では高い中性子ビームを安定して供給できる原子炉が中性子源としては最も一般的になった。しかしそれには炉心まわりの減速材で熱平衡に達した、いわゆる熱中性子ビームを用いるのが主である。一方、中性子と物質の相互作用を表わす割合である断面積は入射中性子のエネルギーとともに変化することがよく知られている。中性子ラジオグラフィーにこの熱中性子以外の中性子を用いることは中性子ラジオグラフィー技術の向上及び応用分野の拡大には不可欠であろう。つまり亜熱中性子、高速中性子、冷中性子などの多面的な利用である。国内で最も遅れていたのは冷中性子を用いたラジオグラフィーであり、それは主として中性子源として適切なものが利用できなかったためである。強力な冷中性子ビームを得るために専用の中性子源が始めて設置されたのは1986年の京大炉であった。1991年には日本原子力研究所のJRR-3Mに設置され、一般に利用可能となった。JRR-3Mの冷中性子導管C2-3の末端に設置された冷中性子照射設備CNRFを利用して冷中性子ラジオグラフィー(Cold Neutron Radiography、以下CNR)に関する研究を行ってきた。筆者らは、一部平成3年度JRR-3中性子ラジオグラフィー研究会及び第4回中性子ラジオグラフィー国際会議[1]で発表した。本報告では更に継続して行った研究成果を述べる。以下に、冷中性子の透過量、透過率に着目した研究結果と、解像力の向上を図った研究結果について報告する。

2. 冷中性子との相互作用

ラジオグラフィーで言う冷中性子は数meV程度のエネルギー領域のものである。熱中性子領域と異なり、冷中性子領域での相互作用率つまり断面積の中性子エネルギー依存性は熱中性子領域においてほど穩やかなものではない。基本的に中性子のエネルギーが下がるほど物質の断面積は増大していく傾向にある。更に一部の結晶性物質にはプラグ・カットオフという断面積が激変する性質も重なってくる。概ねこの二つの性質が、CNRと熱中性子ラジオグラフィー(Thermal Neutron Radiography、以下TNR)を区別することになる。断面積が中性子エネルギーによりかなり変化するということは、すなわち中性子ラジオグラフィー像の使用する冷中性子ビームのスペクトルへの依存度が高い、ということでもある。また冷中性子が中性子導管により導き出

されていることから、そのスペクトルをマックスウェル分布のごときもので仮定することも困難である。つまり冷中性子ビーム装置それぞれで異なった固有の像が得られるだろう。

CNRF (C2-3) のスペクトルと代表的な物質の断面積とを Fig. 1 に示す。断面積変

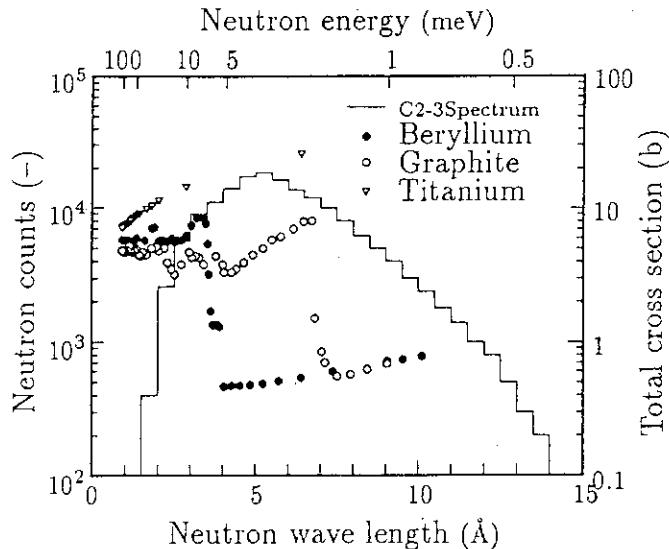


Fig. 1: C2-3 Spectrum and cross section curves of various materials

化を表わす際はエネルギーを軸に取る方が把握しやすいが、スペクトルのデータは文献 [2] のグラフにおいて波長幅で与えられていたため、そのデータを読み取って使用したので、ここでも波長を軸にとって表わしている。このようにプラグ・カットオフをまたぐ形でスペクトルが広がっており、このことは、従来中性子ラジオグラフィーの基礎実験として行われてきた、透過率と厚さの指數関係から実効的な減衰係数（巨視的全断面積）を得る、という行程が物質によっては困難であることを示している。カットオフ以上のエネルギーが高くそれ故断面積も高い中性子は厚さとともに急速に減衰するが、カットオフ以下の断面積の低い中性子はあまり減衰せず、結果として中性子ビームのソフトニングが観察されることになる。そこでそのような現象の基礎的数据を検討するために、実際に幾つかの物質について厚さと透過率の関係を中性子ラジオグラフィーを用いて取得し、評価したので、次章に述べる。

3. 被写体厚さと冷中性子透過率の関係

3.1 散乱中性子の除去

被写体厚さと中性子透過率の関係を中性子ラジオグラフィーにおいて考えるとき、重要なのは散乱中性子の問題である。中性子ラジオグラフィーはとにかく撮像系に応答を与える成分を全て検出する。更に透過量の評価のような定量的解析を行う場合

は、一般に全断面積による中性子ビームが指数関数的に減衰する関係に基づく。以上から、本来像を成すべき成分は被写体を相互作用せずに透過した純粋透過成分のみであるべきであるが、実際には被写体で散乱したが撮像系に到達した中性子や γ 線なども像形成に寄与することに留意する必要がある。

この点はかねてから問題とされ、幾つかの散乱中性子の影響除去法が提案されている[3, 4, など]。本研究においては、被写体と撮像系つまりコンバータの距離を離す方法を取ることによって、この影響を低減することを図った。撮像手法にはフィルム法を用いたので、以下撮像系とはフィルムとコンバータの装填された真空カセットのことを指すものとする。ここでフィルム法でのデータ処理について簡単に述べておく。使用したのは、フィルムにKodakのSR、コンバータにGdの25 μm 蒸着膜である。撮影したフィルムはJRR-3M建屋内で現像処理した。フィルムの黒化度はドラムスキャナ型デンシトメータ(2605型、(株)阿部設計製)で測定され、256階調にデジタル化されて、名古屋大学大型計算機センター内の大型計算機(Facom M-1800/20)に入力される。測定された黒化度はオフセット成分であるベース濃度を減じられた後、別途求めた感度曲線により中性子照射量に変換される。この後必要であれば、入射ビーム分布補正(TV法で言うところのシェーディング補正)を施し、中性子透過率を求めて、その後必要な物理量を求ることとなる。

さて、一般に中性子ラジオグラフィーでは、もともと減速材中でほぼ等方的な方向を向いている中性子をコリメータによって(強制的に)導き出しているため、コリメータの幾何学的寸法によっては完全に平行なビームは得られず、色々の斜め成分を持つ中性子ビームを用いることになる。そのため撮像系と被写体が離れていると、そのことにより画像がぼけてしまう、つまり鮮鋭度が低下する。そこで、鮮鋭度の高い像を得るためにできるだけ被写体を撮像系に密着させることが行われる。しかしこの場合には、上で述べたように、被写体で散乱された中性子もまた撮像系に到達し、透過中性子による定量的なラジオグラフィー像に重なるように被写体依存のにじみ等を生じる。また全断面積から推定するよりも散乱成分の分だけ多くの中性子量によって像を生じさせていることになる。

定量的評価を行う際は鮮鋭度よりも透過量をいかに正確に評価するかが重要であるため、本稿で報告する実験では撮像系と被写体との距離を離して撮影を行った。実際の実験では最大10cmまで離して撮影を行ったが、ビームの非平行性からくる不鮮鋭度はL/D比が100程度であることから1mmである。距離を離すことにより、大きな角度のついた散乱中性子は撮像系全体にまばらに散らばり、大まかには距離の自乗で密度が低下していく。そこで距離を離して幾つか撮影した結果についてここで示しておく。ただしこれらの結果は、京都大学原子炉のE-2熱中性子ラジオグラフィー設備において撮影されたTNRのものである。Fig. 2(a)にその結果を示す。撮影は距離を密着、1cm、5cm、10cmと変えて行い、被写体としては鉄のステップウェッジを撮影し、その厚さと中性子透過率の関係を示したものである。図から気付くことは、まず1cm

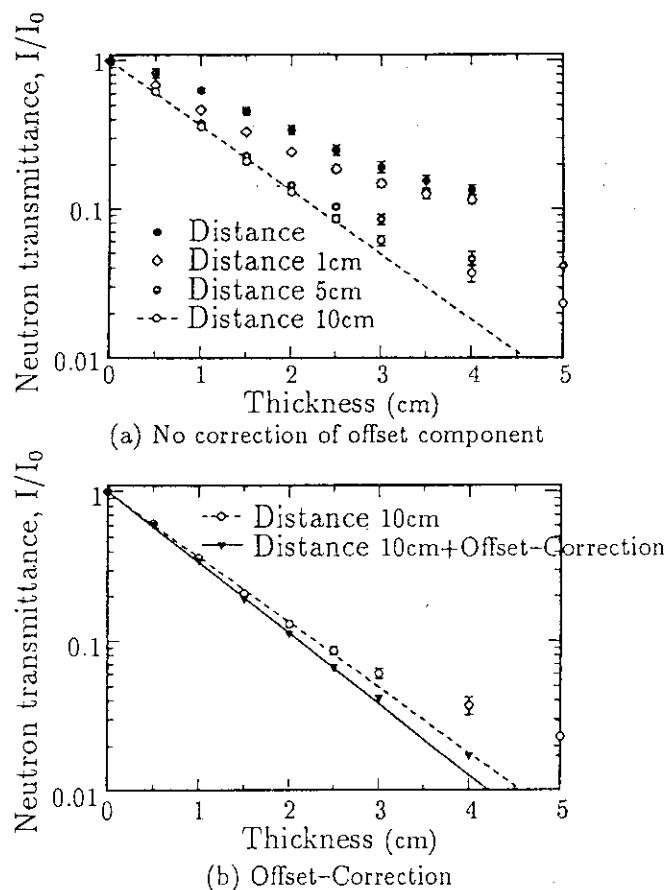


Fig. 2: Neutron attenuation curves of iron step-wedge by using TNR

離すだけでもかなり透過率は密着の場合と比べて小さくなり、5cm、10cmになると更に小さくなるが、この両者の差はかなり少なくなっている。この減衰曲線の差が散乱中性子の寄与を表わしているとすれば、5cm以上離せば実効的に散乱中性子の影響はかなり低くなる、とまず言うことができよう。この図から気付くもう一点は、図中の直線（点線及び実線）は誤差範囲で指數関数を近似して描いた結果だが、距離を離しても透過率0.1以下の指數関係からのずれはなくならないことである。なお、別実験から撮像系の感度特性を検討したが、検出し得る最低の中性子透過率は高めに見積もって0.01程度と推定された。よって、その近傍の値はあまり信用はできないが、それ以上の値は信用できるものである。そして、このずれは γ 線の影響とやはり散乱中性子の影響と考えられる。散乱線は密度がまばらになり顕著に見られなくなってしまって、除去されたわけではないので撮像場には存在する。したがってオフセット成分として減衰曲線に足し合わされていると考えることができる。 γ 線も同様である。そこで試みとして次のようなことを考えてみる。鉄の全断面積を 1.05cm^{-1} とすると5cmを通過した純粹透過成分の透過率は0.005となり検出限界以下である。従って5cmのデータはオフセット成分によるものと考えることができ、例えば距離10cmの場合のデータで検討すると、オフセット成分を0.020と仮定し、それを差し引いて減衰曲線を求め直し

た場合を Fig. 2 (b) に示す。この場合は Fig. 2 (a) よりも指数関数に一致している。

以上から、散乱中性子の影響は距離を離すことで低減できるが、中性子透過率が 0.1 以下の領域では、その他の γ 線、感度特性といった問題と広がって一様化された散乱中性子の影響が現れてくると言うことができる。

なお CNR 実験では、実験体系上の都合から密着と 5cm 離した場合で撮影を行った。また、オフセット成分の補正のために被写体近傍に充分な厚さの B_4C 入りゴム板を設置し、その影の部分の値をオフセット成分として差し引くという方法を用いた。

3.2 ビームの平行度測定

前節で被写体と撮像系との距離を離すことによる画像鮮鋭度の低下について触れた。しかし冷中性子照射設備では中性子導管を用いているために、従来で言う L/D 比という概念が直接は無い。つまり中性子導管を用いて冷中性子源から照射設備まで冷中性子を導いており、中性子導管内では中性子の全反射によって中性子を導いてくるからである。そのためコリメータの様には L/D 比が定義できない。中性子導管の中を中性子が反射するときの全反射する臨界角は中性子の波長によって異なるため、冷中性子ビームはその波長に依存した方向性を持っている。そこで、実効的なビームの平行度を定義し、測定することをまず行ったので、これについて述べる。

入射するビームが方向のばらつきを持っていると、そのばらつきに応じて被写体の影となるべき部分にもビームは回り込むことができる。ビームの回り込みの影響の無い部分を本影と呼ぶが、撮像系と被写体の距離を離していくと、本影の大きさはある一定の割合で小さくなっていく。

ここでまず、この場合の平行度を、ビームの実効的なばらつき角を頂角とする二等辺三角形の高さと底辺の比と定義する（つまり、頂点から出る中性子の方向は実効的に全て二等辺三角形の中に含まれる）。この平行度はダイバージェント型コリメータを持つ中性子ラジオグラフィー設備の L/D 比に相当するものである。中性子導管は全反射により中性子を導き出すから、ある反射角 θ で中性子は導管の壁で全反射される。しかし鏡面が向かい合っていることを考えると、導管出口付近では実質的には鏡面を角 θ をなして透過していると考えることができる。しかも実際の撮影に走査式を用いていることも考慮すると、上述の L/D 比の定義は妥当であると考えられる。走査式とは、フィルムから見ると、走査方向に常にビーム源があることになるからである。この場合頂角の大きさは 2θ となる。ビームには様々な波長の中性子が混合しているおり、様々な頂角があるので、スペクトルから実質的な頂角、つまりばらつき角が決まる。このようにして定義した平行度を測定するために、被写体として中性子吸収物質でできた板に開けた円を考え（板の厚さは無視する）る。穴の直径を a 、被写体と撮像系の距離を l とし、平行度をわかりやすいよう L/D とする。固有不鮮鋭度が充分小さいとする

と幾何学的関係から撮像系上の本影の大きさ w は、

$$w = a - (L/D)^{-1} \cdot l \quad (1)$$

と表わすことができる。したがって L/D つまり平行度は、距離を変えて撮影することにより、本影の大きさと距離の関係から得ることができる。

実際の被写体には薄さ 1mm の Al 板に $25\mu\text{m}$ 厚の Gd 箔を貼り付け、直径 2mm の穴を開けたものを用いた。Fig. 3 に測定結果を示す。二本の線が描かれているが、これはそれぞれ本影の大きさを水平方向に測った場合と垂直方向に測った場合について示している。これにおいて距離 0mm の場合の本影の大きさがどちらも 2mm になっていないが、これは工作精度、設置精度及び平行度の定義の問題などがあると考えられる。しかし平行度は傾きによって定めるので、この場合このことはあまり重視しないものとする。直線の傾きから求めた平行度は、水平方向で 102、垂直方向で 78 であった。これから、ビームの平行性による幾何学的不鮮鋭度は、先に述べた実験条件である距離 5cm の場合、水平方向で 0.5mm 程度、垂直方向で 0.6mm 程度となり、被写体の大きさ（幅 1cm、長さ 4cm 程度）に対して充分小さいことが確認された。

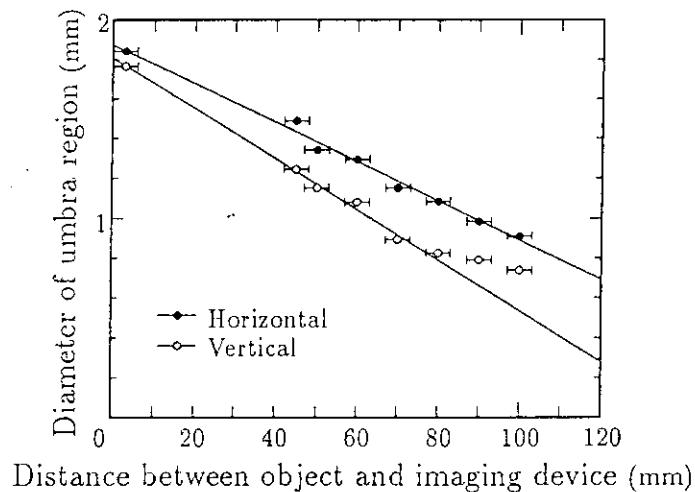


Fig. 3: Measurment of L/D ratio of CNRF

3.3 被写体厚さと冷中性子透過率の関係

Fig. 4 に CNR で鉄のステップウェッジを撮影した場合の厚さと透過率の関係を、距離を二通り変えた場合について示す。5cm 離した場合はオフセット補正がしてあり、先のデータはそれをしていない、という違いはあるものの、両者の差は 3.1 で見た TNR の場合に比べて小さいことがわかる。これは散乱中性子によるにじみの効果が CNR の場合、TNR よりも少ないということである。これはステップウェッジのプロファイル

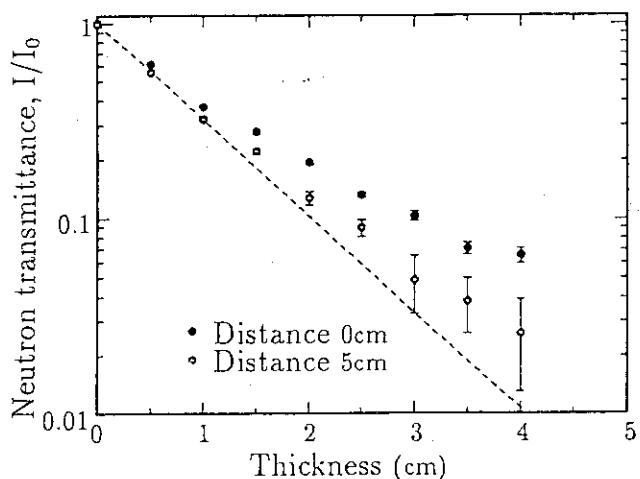


Fig. 4: Setting to be apart from the detector

からも顕著にわかることがある。密着の場合の CNR と TNR の Fe ステップウェッジのプロファイルを Fig. 5 に示す。TNR の場合ステップのエッジ部や厚いステップ部（黒

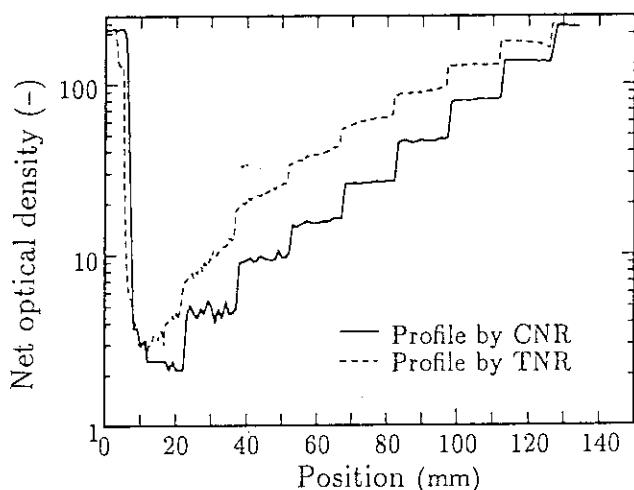


Fig. 5: Comparison between CNR and TNR profiles

化度の低い部分）においてプロファイルの歪みが見られる。一方 CNR の場合は各段は鋭角な階段状を成しており、見かけ上散乱中性子によるにじみなどの影響はないようである。Barton [5] はベリリウムとビスマスのフィルタにより生成した冷中性子ビームを用いて、やはり散乱線量の少ないことを述べ、主にプラグ・カットオフによる（散乱）断面積の低下と自己遮蔽によるものと考察しているが、ここでもより広いスペクトルを持つ冷中性子ビームで同様の効果が（定性的に）観察された。

再び減衰曲線の Fig. 4 に戻る。この図からわることは、距離 5cm の場合であって

も、中性子透過率の高いところで指数関係から外れて下に凸の弧を描いていることがある。さきに見たように透過率が充分低いところでは、撮像系に関する因子のために関係が歪む。しかしこの図では透過率がそれほど低くない部分から指数関係からのずれが始まっている。つまりこのずれは、CNRにおける冷中性子スペクトルのソフトニング（低エネルギー側へのシフト）が見られていると考えられる。鉄は0.005eVにプラグ・カットオフを持っている。その断面積変化はそれほど大きいものではないが、最大で約60%程断面積が低下している。また冷中性子束もカットオフ近傍で最も高くなっている。したがって透過する厚さが増すほどカットオフ以下のエネルギーを持つ断面積の低い中性子の割合が高くなり、実効的な断面積が低くなっていくのであろう。

他の物質について見た結果をFig. 6に示す。検討した物質は鉄の他にグラファイト、

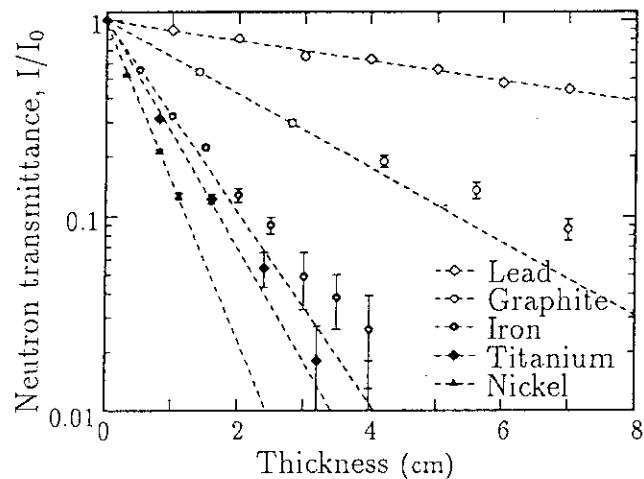


Fig. 6: Neutron attenuation curves of various materials

ニッケル、鉛、チタンである。これらはチタンを除き、いずれもプラグ・カットオフを持つ物質である。ここでは、グラファイトに大きな弧が見られる。グラファイトは0.0018eV付近に比較的大きなプラグ・カットオフを持つためである。ニッケルは比較的大きな透過率の厚さの撮影だったので、ソフトニングの影響が見られるかどうかはわからない。鉛の場合は指数関数を良く満たしているように見られる。これはカットオフが比較的短波長側にあり、かつカットオフによって断面積が低下した後の断面積変化が緩やかであるからであると考えられる。またその実効的な断面積もTNRの場合よりも小さくなってしまい、CNRの特徴としての透過力の増大が見られる。チタンはプラグ・カットオフを持たず、 $1/v$ 則的に断面積が増加していく物質だが、測定範囲ではほぼ指数関係を持つと見ることができる。誤差範囲ではあるが（低中性子透過率ではオフセット成分を差分することによる誤差の増大が目立つ）、わずかに弧を描いているように見られるが、これは $1/v$ 則的に変化する断面積によるハードニング（高エネルギー側へのシフト）と見なせるかも知れない。これについては更に詳細な検討が

必要である。

このように、鉄とグラファイトの結果は、ソフトニングという CNR の特徴を示している。つまり定量評価において重要となる全断面積が特定できない。もちろん断面積のライブラリと計算により单一物質の全断面積は計算可能である。しかし未知物質、複合物質などを扱う場合、特に CT (Computed Tomography) を行う場合、問題を生じさせると考えられる。従って CNR を更に有益なツールとしていく際には、このソフトニング問題をうまく処理する必要があると考える。

4. CNRF での TV 法及び冷中性子 CT

本稿では、一般的な TV 撮像法により、冷中性子 CT を行った結果について述べる。この一部は始めに述べたように既に発表しているが、ここではまず、CNRF における TV 法 CT という点から実際の実験を行う上で生じた問題点について述べ、続いて冷中性子の透過力に着目した冷中性子 CT について述べる。

4.1 CNRF での TV 法による撮像

CNRF では、冷中性子導管を用いて中性子を導いているために、照射野が非常に限定される、ということがある。導管サイズは 2cmW × 5cmH である（周辺部は中性子束が一様でなくなつて来るため、実際使用できる範囲はもう少し狭まつてくる）。一般にラジオグラフィーをする被写体は数 cm 角以上の寸法であり、従って CNRF で CNR を行うには走査という処理が必要となる。一次元の走査処理を加える（通常横方向）ことで、例えばフィルム法なら照射野はフィルム幅 W × 5cmH まで大きくなる。しかし TV 法で用いる TV カメラ（この場合 SIT 管）は蓄積型ではないので、走査という処理は構造上不可能である。そこで画像処理的に走査を行うことになり、そのための装置として（株）日本リサジュー製の画像処理装置が（TNRF と兼用であるが）CNRF には設置されている。

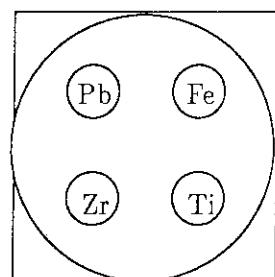
この装置により画像処理的に走査を行うのだが、問題は走査に関するパラメータの決定である。そのパラメータとは単位画像幅、積算フレーム数、画像合成速度、試料走査速度、とでも言うべきものである。画像処理による走査は次のような手順による。まず電子的に単位画像幅に画像が制限され、設定された積算フレーム数分が積算される。その単位画像が画像合成速度により定まる割合で、画面上に並べられていく（合成されていく）。このとき試料台を同期して送り、被写体について走査された像が得られるようになっている。

しかし、経験的にではあるが、この撮像法には幾つか問題点がある。まず、画像合成と試料台の送りは同期しているが、その速度は互いに独立している。したがって画像合成速度と試料走査速度の選択により、画面上の走査範囲は画面の縦横比から定ま

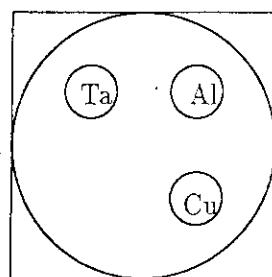
る本来の範囲とは違う値になり得る、つまり縦に対し横が伸びたような像や縮んだような像が合成されてしまうのである。また、単位画像幅内で積算を行っているが、その積算中も試料台は移動している。従って試料走査速度が速い場合、移動する物体を撮影中積算するために尾を引くがごとく、画像ににじみが生じ、特にエッジ部のプロファイルが著しく歪む。これは例えば15cm程度の範囲を15秒程度で走査する場合にも生じる。走査による画像に出るこのにじみについては経験的にパラメータ設定法を明らかにする必要がある。

4.2 TV 法による冷中性子 CT

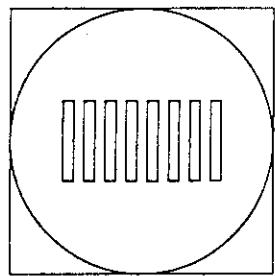
CTを行う場合の撮像系は、中性子ラジオグラフィーの場合、TV 法が最も一般的である。それは再構成計算処理において、TV 法のような電子撮像法での多数のデータを計算機に入力する作業が最も容易だからである。



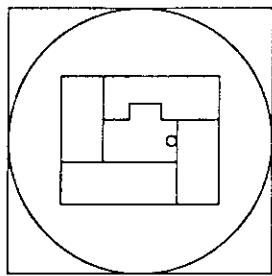
Object 1



Object 2



Object 3



Object 4

Fig. 7: Objects for neutron CT

上で述べたように、中性子透過率が低い領域では、物質によってはソフトニングを生じ、実効的な全断面積が低下する。また実験上の問題では、前節で述べたにじみの問題も生じた。にじみの問題は CT 用の投影データの解析の時点で明らかになった問

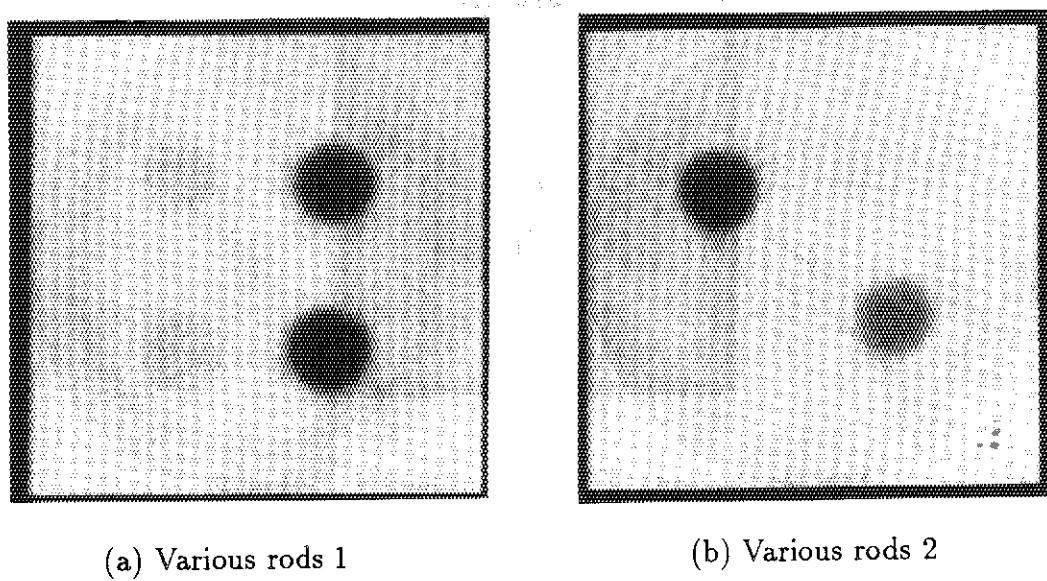


Fig. 8: Example of NCT by using TV method 1

題であったため、CT にもその影響が現れた。そこで、ここでは再構成はにじみの影響がなるべく現れないように行ない、CT 像の議論は全体的なもののみについて行う。

投影データの処理は以下の手順で行った。走査して得られた各投影データは S-VHS ビデオに録画される。投影データの A/D 変換は Image Σ（日本アビオニクス社製）で行い、256 階調のディジタルデータにした後、名古屋大学大型計算機センターの大型計算機に入力し、各種補正の後、CT 像再構成を行った。再構成手法は Shepp と Logan のフィルタを用いたコンボリューション法である。CT 像は同計算機センター内にある画像処理装置 FIVIS (Fujitsu Integrated Visual Information System) によりコントラストが最もついた状態で、再び S-VHS ビデオに録画され、ビデオプリンタ (VY-200、(株) 日立製作所製) で出力される。

Fig. 7 に CT に用いた被写体についてまず示しておく。続いて Fig. 8 (a)、(b) に各種物質の直径 1cm 円柱を配した（被写体 1、2）CT 像を示す。円柱の内部が、上側が下側より薄くなっている様子が見られるが、これが前節で述べたにじみの影響である。片側に現れているのは、再構成を半回転で行ったためで、これを全回転で行うと、中心が高く周辺が低くなる。CT 値をできるだけ保存するために半回転で再構成を行ったのである。この図から鉄、銅と比べてチタン、タンタルといった物質は冷中性子 CT で断面積が高く評価されていることがわかる。熱中性子領域ではチタン、タンタルは鉄や銅より断面積が低いが、 $1/v$ 則で変化するため冷中性子領域では断面積の大小が逆転

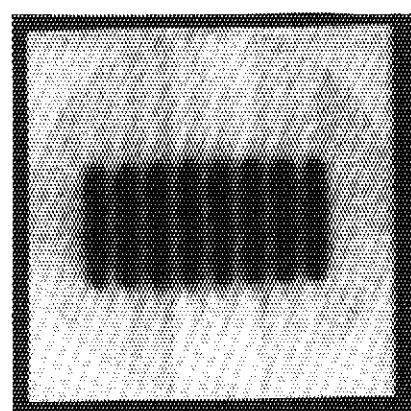


Fig. 9: Example of NCT by using TV method 2

している。

Fig. 9に薄さ 2mm、長さ 15mm の鉄の板を 8 枚並べた被写体（被写体 3）の CT 像を示す。また CNR の透過力を示す例として、次に Fig. 10 (a) に同じ被写体のビーム側の方に厚さ 60mm の鉛ブロックを設置した場合の CT 像を示す。鉛は熱中性子に対してもあまり断面積は高くないが、冷中性子に対しては、既に見たように更に断面積が低下するため、このような CT も可能となる。Fig. 10 (b) に同条件の TNR-CT の場合を示す。再構成はなされているものの、アーチファクトが多数発生し、画像自体も不鮮明なものとなっており、熱中性子ではこの CT は困難であることがわかる。

このように投影データに含まれるにじみ効果のため、例示的な結果しか示すことができないが、CNR を用いることの効果が示された。

4.3 フィルム法による簡便な中性子 CT

前節での CT は撮影後の処理の簡便さから撮像法に TV 法を採用したが、TV 法では標準のレンズでは画素サイズをあまり細かく取れないこと、蛍光コンバータを用いていることから来る分解能の限界などデメリットがある。処理法を改善し、フィルム法でも簡便にデータ処理ができるのであれば、CT には静止画しか必要ではないから、TV 法よりフィルム法の方が、解像力で優れている面があるなど望ましい。

CT には、その再構成方法にもよるが、通常のアルゴリズムでは経験上半回転で最低 20 度の方向からの撮影を必要とする。1 枚のフィルムに 1 角度で撮影を行えば、20 枚ものフィルムの撮影、現像、計算機への入力処理が必要となる。更に再構成計算は回転軸の位置出しが必要であるから、これらデータ間の位置補正も行わねばならない。

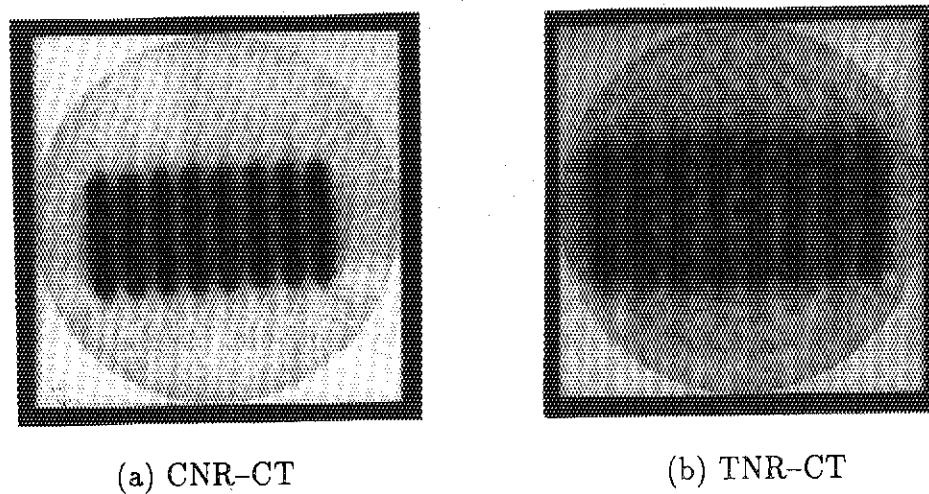


Fig. 10: Comparison between CNR-CT and TNR-CT

これは想像以上に面倒な処理であり、処理時間を大幅に増大させてしまう。また投影データ数を増やせばそれに比例して処理時間も長くなってしまう。この点が CT にフィルム方を用いる際の問題点あるが、逆に言うと、これを解決すれば、フィルム法による高解像度の CT も可能となるわけである。つまり処理フィルム枚数を少なくすればよい。

CNRF の冷中性子導管は既に述べたように、照射野が $2\text{cmW} \times 5\text{cmH}$ と狭いものである。そのために走査が必要であるわけだが、走査をしなければ、導管サイズの画像が 1 枚のフィルム上に多數撮影できる。つまり照射野を狭くして 1 枚のフィルム上に、例えば 20 回撮影ができれば、上で述べたように投影データの数はそのままで、処理フィルムを 1 枚にすることができる。また各投影データ（撮影場所）間の位置関係も厳密に決まったものとすることが可能である。これら極めて単純な措置によりデータ処理は大幅に簡便となるのである。

しかし実際このことを実行するには幾つか問題がある。まず照射野を狭くする点であるが、これは CNRF において撮影を行う場合は既にかなり狭められているので、それほど困難ではない。しかし一般的な設備では、中性子を完全に遮蔽し、 γ 線等外乱となるものを出さない条件を簡便に設定することは多少の困難を伴うだろう。したがってフィルム法 CT は中性子導管を用いる冷中性子独自のもの、と言えるかも知れない。

もう一つはシャッターのスピードで、低中性子束の設備ならそれほど問題ではない。しかし CNRF の場合、炉が 20MW 定常運転時 $2.0 \times 10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ [2] という高中性子束

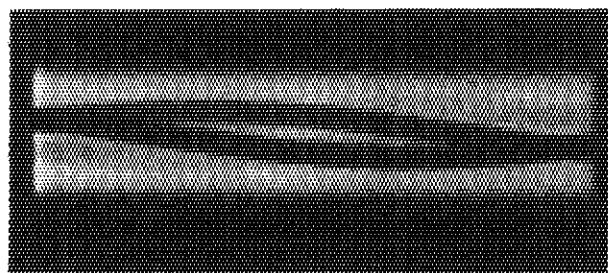


Fig. 11: Projection data obtained by using film method

で、例えば撮像系が Gd $25\mu\text{m}$ 蒸着膜と KODAK の SR との組み合わせでは、照射野分で黒化度 3 度を得るのに要する照射時間は 4~5 秒程度である。現在の CNRF のシャッターは全閉-全開-全閉の走査には十数秒を要し、非走査の撮影は不可能である。従ってもっとレスポンスの良いシャッターシステムを組み込む必要がある。

本稿で報告する実験時は、そのようなシャッターシステムを組み込まなかったため、試験的に簡便なフィルム法による CT を行うという観点から、走査式撮影で行っている。つまり回転軸を走査方向に平行にとり、被写体を回転軸方向に一様な形状とする。走査は連続的に行うが、被写体の回転は離散的に、ある時間間隔毎に行う。この場合、回転しているときの像はぼけてしまうが、回転していないときの像は、被写体が軸方向に一様であるから、あたかも走査していないがごとくに撮影される。こうして一走査で半回転分回転させれば、近似的に連続してサイノグラム状になった投影データ群が得られる。これは一定間隔で投影データが並べられたものだから、読み取り時も一定間隔で読み取れば良く、回転軸のずれもほとんど生じないため、データ処理は容易であった。

Fig. 11 に得られた投影データの像を示す。これは 4 種の物質の直径 1cm の円柱を配した被写体 1 のもので、前節で示した CT 像の被写体と同様のものである。ただし円柱の配置は若干異なっており、右上 Pb、右下 Zr、左上 Fr、左下 Ti となる。角度数は 40 個/半回転であった。Fig. 12 に再構成結果を示す。なお、図中の白黒のパターンは再構成像上で 1mm 間隔のサイズを表わしている。CT 像は鮮鋭度が良くないが、これは、撮影体系の都合上撮像系と被写体をあまり近づけることができなかったためで、この場合約 9cm 離れており、不鮮鋭度を 3.2 で求めた平行度から求めると約 1mm となる。

Fig. 13 (a) にもう一つの CT 像を示すが、これは厚さ 5mm の鉄の板で製作した被写体で内部に直径 0.9mm のナイロン糸を配したもの（被写体 4）である。さほど鮮鋭度は良くないが、板に作った幅 3mm、深さ 2mm の切り欠きやナイロン糸、更に鉄板を張り合わせたエポキシ樹脂系接着剤が明確に再構成されている。この被写体を TV

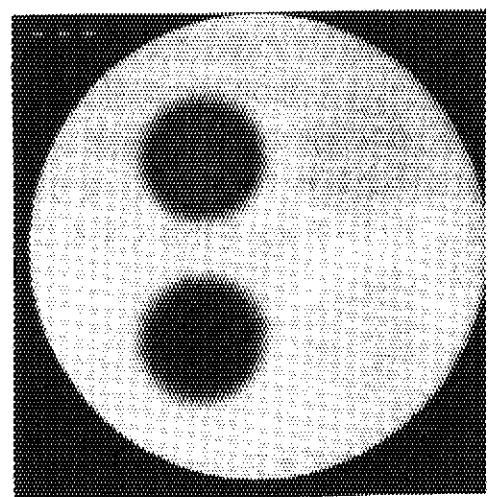


Fig. 12: NCT image by using film method

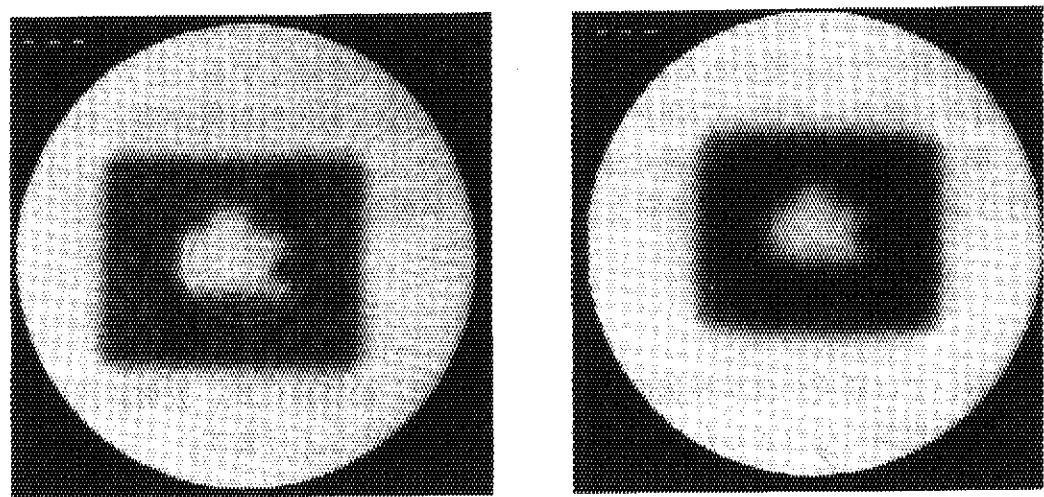


Fig. 13: Comparison of film method-NCT and TV method-NCT

法による CT で行った例を Fig. 13 (b) に示すが、両者を比較すると、TV 法 CT の方が明らかに像質は悪く、フィルム法 CT の優位性が示された。

シャッターシステムや被写体と撮像系間の距離の問題などを改善して行ったフィルム法 CT (ただし実験は京都大学原子炉実験所の京大炉に設置された冷中性子導管 CN-2 出口にて行った) では、フィルムの読み取りアーチャー (つまり画素サイズ) $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ で分解能 $300\mu\text{m}$ [6] が得られ、アーチャーを小さくすることで容易に更なる解像力の向上が期待できることがわかった。

5. 結び

JRR-3M の CNRF を用いたラジオグラフィーの基礎実験から、以下のような特徴が確認された。

まず、CNR では、装置の中性子ビームの平行性はそれほど良くないが、被写体からの散乱線によるにじみ等の影響が TNR に比べ小さい。従って、分解能的、或いは形状的観察に適しているということができる。

CNR の定量的な解析を行う場合、物質の全断面積の中性子エネルギー依存性から来るスペクトルの変化が生じることを考慮すべきである。

CNRF における TV 法走査式撮影は、パラメータによっては信頼性を欠く画像となり、選択を慎重に行う必要がある。これらは概ね走査時間を遅くすることで達成される。

CT を行うにあたっては、CNRF のような冷中性子導管は照射野が限られていることから、簡便なフィルム法を容易に適用することが可能であり、それにより TV 法で CT を行うよりも画質、分解能を向上させることが可能である。

謝辞

実験においては研究炉部炉技術開発室の鶴野晃氏、松林政仁氏、放射線照射協会の安藤均氏にお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Oda, M., et al., "Basic research of cold neutron computed tomography at Japan Research Reactor-3M", in Barton, J. P. ed., *Neutron Radiography(4)*, pp.603-609, Gordon and Breach Publishers, 1994.
- [2] 鈴木正年 他, "JRR-3M 中性子導管の特性測定", JAERI-M92-201, 日本原子力研究所, 1993.

- [3] Kobayashi, H., et al., "Macroscopic cross section measurements and defect detection in materials using neutron radiography technique", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 29, No. 11, pp.1045-1053, 1992.
- [4] Tamaki, M., et al., "Basic research on quantitative neutron radiography using neutron absorbing honeycomb collimator", in Barton, J. P. ed., *Neutron Radiography(4)*, pp.833-844, Gordon and Breach Science Publishers, 1994.
- [5] Barton, J. P., "Radiographic examination through steel using cold neutrons", *British Journal of Application Physics*, Vol. 16, pp.1833-1839, 1965.
- [6] 小田将広 他, "写真法による簡便な高解像度中性子 CT の開発", 日本原子力学会 1992 年秋の大会, K32.
- [7] Kobayashi, H., "Preliminary study for cold neutron radiography", in *Proceedings of the 3rd Asian Symposium on Research Reactor:ASRR-III*, pp.589-596, Japan Atomic Energy Institute, 1991.

3.3 中性子イメージングプレートと中性子ラジオグラフィへの応用

唐澤裕子、新村信雄、高橋健治^{*}、斎藤浩樹^{*}

日本原子力研究所 先端基礎研究センター

富士写真フィルム株式会社宮台技術開発センター^{*}

§ 1. はじめに

イメージングプレート(IP)は、以前から医療診断分野で使われてきたが、特にタンパク質等の生体高分子単結晶構造X線解析用二次元検出器として、その有用性が実証され、この分野の目覚ましい進歩に寄与したことで、一躍注目を集めた。¹⁾ それは、検出効率が約100%、位置分解能が0.2mm以下、ダイナミックレンジが5桁、面積が数100mm×数100mmというすばらしい特長が、多いに寄与したためである。

中性子イメージングプレート(IP-ND)の開発は、それに較べ相当の遅れをとっているが、最近、専らGdをコンバーターとして用いることにより行われてきた。方法としては、Gd箔をX線用IPと密着させる^{2,3)}か、Gd化合物をX線用IP蛍光体中に混ぜ込む^{3,4,5)}かである。

我々は、現在、生体高分子結晶構造解析用中性子回折計(BIX)を建設し、このための検出器としてIP-NDを実用化することを計画し、富士写真フィルム(株)と共同でIP-NDの開発研究を開始した⁶⁾。

ここで、その途中経過を報告すると共に、最近IP-NDの中性子ラジオグラフィーへの応用の試みを行ったので紹介する。

§ 2. 中性子イメージングプレート

2.1 IP-NDの原理

我々の用いたIP-NDは輝尽性蛍光体としてBaF(Br·I):Eu、コンバーター物質として^{Na¹⁴Gd₂O₃}及び、^{Na¹⁴LiF}を用いた。中性子がGd(もしくは⁶Li)に捕獲されると電離性放射線を放出する。この放射線は周囲の原子を電離し、電子及びイオンを生成する。この電子及びイオンはF⁺中心とEu²⁺イオンにトラップされ、それぞれF中心とEu³⁺イオンになる。これは準安定状態でF中心が吸収する波長の光を照射すると、トラップされた電子はEu³⁺に戻り、再結合し、Eu²⁺に戻る。この時の発光を輝尽性蛍光(PSL)として計数する。IPに照射される放射線量と準安定状態であるF中心の生成数に直線関係があることを利用して放射線検出器となる。

2.2 コンバーター

中性子は電荷を有しない粒子であるから、輝尽性蛍光体中にカラーセンターを生成させるために中性子を電離性放射線に変換するコンバーターが必要である。Table 1 に中性子検出に広く利用される核反応を示す。

2.3 中性子検出効率

中性子検出効率 E_f は(1)式で求められる。

$$E_f = 1 - \exp(-N \sigma t) \quad (1)$$

ここで、 N 、 σ 、 t は、それぞれ単位体積中のコンバーターの数、コンバーターの全断面積及びIP の厚さである。

中性子検出効率を増すには、IP の厚みを増すのが良いが、厚すぎるとIP からの輝尽性蛍光 (PSL) がIP 自身で吸収されるので好ましくなく、100~200 μm が用いられる。 ^{10}B 、 ^3He 、 ^6Li 、 NaGd が、それぞれモル比で輝尽性蛍光体と 1 : 1 で混入されたとした場合、IP の厚みが 220 μm の時の中性子検出効率は(1)式から、それぞれ、0.32、0.56、0.10、0.96 と求められる。

2.4 二次粒子の輝尽性蛍光体中の飛程

コンバーターからの荷電二次粒子は、周囲の原子を電離させ、エネルギーを失い消失する。輝尽性蛍光体中のカラーセンターは、この電離電子によって生成されるので電離電子の飛程で形成する体積がIP の位置の分解能に大きく寄与する。

荷電粒子の飛程の計算方法は、教科書等⁷⁾ に詳細に書かれているので、ここでは概略のみ述べる。

エネルギー E_i の荷電粒子の物質中の飛程は、質量阻止能 (1 g/cm^2 あたりのエネルギー損失) dE/dx を用いると

$$R(E_i) = \int_0^{E_i} \frac{dE}{(dE/dx)} \quad (2)$$

と表現されるが、広いエネルギー範囲にわたって、種々の物質毎に dE/dx が得られていないため、(2)式の計算は厳密には行えない。実際的には各粒子、各物質毎に飛程と粒子のエネルギーとの関係が適当なグラフ、表、実験式等で与えられており、それらを組み合わせて用いるのが便利である。

<α粒子>

標準空気中(15°C, 760mmHg)のα粒子のエネルギー・飛程関係がグラフで与えられており、これより標準空気中での飛程 R_{air} (cm) が求められる。次に、原子量が A の物質中の飛程 R_{α} (mg/cm²) は、(3)式の実験近似式から求められる。

$$R_{\alpha}(\text{mg/cm}^2) = 0.56 \cdot R_{\text{air}} \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

<陽子>

0.5 MeV 以上の陽子の場合、α粒子の飛程 (R_{α}) が判明していると、近似的に(4)式が得られているので陽子の飛程 R_p が求められる。

$$R_p(E) = 1.0072 \cdot R_{\alpha}(3.972E) \quad (4)$$

<トリチウム>

陽子の飛程が判明していると、トリチウムの飛程 (R_T) は電荷が陽子と同じであるから、質量の違いのみを考慮して(5)式から求められる。

$$R_T(E) = 3 \cdot R_p\left(\frac{1}{3}E\right) \quad (5)$$

<電子>

電子の飛程は(6)式から得られる。

$$\begin{aligned} R_e(\text{mg/cm}^2) &= 412 \cdot [E(\text{MeV})]^n \quad , \quad 0.01 < E \leq 3 \text{ MeV} \\ n &= 1,265 - 0.0954 \ln E \quad (\text{MeV}) \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (6)$$

$$R_e(\text{mg/cm}^2) = 530 E(\text{MeV}) - 106, \quad 3 \leq E \leq 20 \text{ MeV}$$

以上の計算式から¹⁰B、⁶Li、Gd からの二次粒子の輝尽性蛍光体中の飛程を求める Table 2 のようになる。ただし、輝尽性蛍光体の原子量(平均)を78.7、平均充填密度を3.4g/cm³とした。

§ 3. 中性子イメージングプレート開発の現状

3.1 IP-NDの種類

今回作成したIP-NDはコンバーターが、Gd、⁶Li（ただし、今回は試験的に⁶Liを7.4%含む⁷Liを使った）の、2種類である。各々、蛍光体層の厚みと、コンバーターの含有量を変え、計10種類のIP-NDを作成した。Table3に今回用いたIP-NDの仕様を示し、併せて後述の中性子検出効率も示す。

3.2 ダイナミックレンジ

IP-NDのダイナミックレンジ測定実験は日本原子力研究所JRR-3MガイドホールのTAS2（Triple Axis Spectrometer2）で行った。

IPの読み取りは、高エネルギー物理学研究所のBAS2000でおこなった。

PG（パイロリティックグラファイト）によって単色化された波長1.8Åの中性子を、5mmのB₄Cのスリットを通してIP-NDに照射する。IP本体はB₄Cの遮蔽用カセットに入っており、そのカセットをアルミニウムのレールの上をスライドすることで露光場所を変えることができ（Fig.1）、照射時間を変えることにより入射中性子数をコントロールする。モニターとして0次元カウンターを使用した。

そのようにして得られたパターンの一例をFig.2に示す。

感受した中性子に反応して得られる量は、IPではPSL（photostimulated luminescence 輝尽性蛍光）であり、フィルムでいう黒化度に相当する。

PSL、バックグラウンドは以下のようにしてとった。各々のスポットにつき、左右2ヵ所の14mmの大きさの楕円形内を、200×200μm単位のピクセル毎に読み取り、ピクセルでの平均した値をバックグラウンドとした。スポット自体のPSLも14mmの大きさの楕円形内のPSLを平均した値とし、そこからバックグラウンドの値をひいたものを実際のデータとした。

Fig.3に入射中性子数とPSLの関係を示す。Li、Gdとともに広範囲にわたって良い直線性を示しており、Gdは5桁、Liは4桁のダイナミックレンジを確認できた。

ただし、低中性子強度側はフェーディングの効果と、遮蔽が不完全のためS/N比が悪く、精度よく測定することができなかった。今後、より広い範囲のダイナミックレンジを測定するにはこれらの条件を改善する必要がある。

3.3 位置分解能

中性子用IPの分解能はLiFタイルを使って測定した。2枚のLiFタイルで幅10mmのスリットを作りそこに一様な中性子を入射する。スリットのピクセル毎（200μm）のプロファイルをとる（Fig.4）と、Gd-IPでは、半値幅が10.4mmであった。IP-NDの読み取りのピクセルサイズが200μm×200μmであることと、スリットの厚さによるビームのコリメートが0.2°以下なので、分解能は200μm以下である。

厳密には、分解能はコンバーターによって異なる。Gdは内部転換電子だけでなく、飛程の大きいγ線も放出する。この飛程は⁶Liから放出される二次粒子の飛程よりも大きいため、分解能はGd-IPよりLi-IPのほうが良いはずである。しかし、今回の実験条件で

は読み取りが $200\mu\text{m}$ 単位なのでその違いは見えない。

今後は読み取り機側の制約はあるが、より小さい分解能を確認したい。

3.4 検出効率

各IPの検出効率 E_f は(7)式から計算する。

$$E_f = 1 - \exp(-n \sigma t) \quad (7)$$

但し、 n は単位体積当りの中性子コンバーター原子の数、 σ は 1\AA での中性子コンバーターの中性子散乱断面積、 t はIP-NDの蛍光体層の厚さである。

Gd-IPの蛍光体層の厚さは $85\mu\text{m}$ 、 $130\mu\text{m}$ で、検出効率はそれぞれ、31.6%、44.0% Li-IPの蛍光体層の厚さは $130\mu\text{m}$ 、 $190\mu\text{m}$ で、検出効率は0.45%、0.66%である。但し、Li-IPは今回の実験ではnatural Liをもちいたので、 ^6Li を7.4%含むとして計算してある。100%濃縮 ^6Li でLi-IPを作成すれば検出効率は増加するが、それでも厚さ $190\mu\text{m}$ のもので7.0%と極めて小さい。

検出効率を上げるには単位体積当りの中性子コンバーター原子の数(n)を増やすか、蛍光体層の厚さを厚くすればよい(t を増やす)。

しかし実際には、IPフィルムの作成方法によって、 n は制限される。また、IP読み取りの時に発する輝尽性蛍光はIPが厚いとIP自身で吸収される(前述)ので、蛍光体層の厚さは $200\mu\text{m}$ 以上にするのは無意味である。

ただし、Li-IPはその核反応の特性から、以下のような方法で検出効率を上げることができる。 ^6Li は、2.05MeVの α 粒子と2.74MeVのトリチウムを生成し、その飛程は小さいため、自身のIPから飛び出すことはない。したがって ^6Li に捕獲された中性子は、そのプレートにのみ影響をおよぼす。つまり、Li-IPを複数枚重ねると、一枚目のIPで捕獲された中性子はそのIPだけで検出される。一方、捕獲されなかった中性子の一部はそのまま2枚目のIPで捕獲され同様に核反応を起こし、検出される。

こうして重ねて照射したIPを一枚ずつ読み取り、あとから一枚毎のPSLを加算する。このように複数枚のLi-IPを重ねて検出効率を上げることができる。ただし、IPの支持体のポリエチレンで中性子が散乱されるので、下方のIPは、分解能、強度などを補正する必要がある。

3.5 コンバーターの種類の変化によるPSLの変化

変換原子の異なる2種の中性子用IPの検出効率と、PSLとの関係を表わしたのがFig.5である。検出効率は、Gd-IPでは蛍光体層の厚さによって違う。Li-IPでは、蛍光体層の厚さが $130\mu\text{m}$ のものと、 $190\mu\text{m}$ のものでは検出効率がわずかしか違わないのので、検出効率をあげるために複数枚重ねて検出効率をあげたもののデータを使用している。

フィッティングした直線の傾きの、LiとGdの比は、捕獲された1個の中性子が作るPSLの比に相当する。これによると、捕獲された中性子はLi-IP内ではGd-IP内に比べて約30倍ものPSLを作っている。これは、⁶LiとGdの変換によって放出される変換二次粒子のエネルギー比に対応しており、PSL発生が変換二次粒子のエネルギーに依存していることのあらわれである。

IP-NDは、コンバーターの種類や量を調節することで検出効率とPSLの関係をコントロールできることが示唆され、将来のIP-NDの設計に有用な指針となる。

§ 4. 中性子ラジオグラフィーへの応用

4.1 実験

中性子ラジオグラフへの応用を図るために、日本原子力研究所JRR-3M、7Rの中性子ラジオグラフィー装置で実験を行った。

照射したビームは、 $20 \times 20\text{cm}$ の一様な中性子ダイレクトビーム ($10^9 \text{n/sec} \cdot \text{cm}^2$) と、ビスマス単結晶に通したビームで、ビスマスの厚さを5、10、15cmと変えたものの4種類である。ビスマス単結晶を通すことによってカドミウム比及び、 γ 線の割合が変わる。Fig.6にビスマス単結晶の厚さと熱中性子、 γ 線の強度およびカドミウム比の関係を示す³⁾。

サンプルは、中性子ラジオグラフィーの標準として用いられている Sensitivity Indicator (S.I.)、Beam Purity Indicator (B.P.I.)、厚みを階段状に変えた8種の素材 (銅、ステンレス鋼(SUS)、真ちゅう、亜鉛、銅、鉛、グラファイト、テフロン) を使った。

ダイレクトビームと厚さ5cmのビスマスを通したビームでGd-IPを、厚さ10cmと15cmのビスマスを通したビームでLi-IPをそれぞれ照射した。照射時間はすべて1秒である。

Fig.7にGd-IPを用いた時のイメージの一例を示す (ダイレクトビーム、照射時間1sec)。

4.2 中性子、 γ 線特性

中性子ラジオグラフィーの標準サンプルとして用いられている Beam Purity Indicator (B.P.I.) から、ビームが、熱中性子、 γ 線を含む量が見積もれる。フィルタとして用いたビスマス単結晶の厚さを変えたときの、ビスマスの厚さと、照射したIPの性質と、そこから得られた熱中性子、 γ 線の含有比の目安をTable4に示す。

ビスマスの厚さを変えたときのGd-IPのPSLの寄与は(8)式で与えられる。

$$\text{PSL}_0 = \epsilon_{\text{Gd}}^N \cdot I_0^N + \epsilon_{\text{Gd}}^\gamma \cdot I_0^\gamma \quad (8)$$

$$PSL_i = \epsilon_{Gd}^N \cdot I_0^N + \epsilon_{Gd}^\gamma \cdot I_0^\gamma$$

ここで、 PSL_0 はビスマス単結晶がないときの PSL 、 ϵ_{Gd}^N は Gd -IPの熱中性子の見かけの検出効率、 ϵ_{Gd}^γ は Gd -IPの γ 線の見かけの検出効率、 I_0^N 、 I_0^γ はそれぞれビスマス単結晶がないときの入射中性子束、 γ 線で、 I_1^N 、 I_1^γ は厚さ2.5cmのビスマス単結晶が一枚のときの入射中性子束、 γ 線である。

PSL は入射中性子と入射 γ に各々の見かけの検出効率 ϵ_{Gd}^N 、 ϵ_{Gd}^γ 、(後述)をかけたものの足し合わせよりなる。ここから Gd についての中性子と γ 線の、 Li についての中性子の見かけの検出効率がもとまり、それぞれ、 2.616×10^{-6} 、 2.191 、 4.2748×10^{-6} 、である。(ただし、 Li についての γ 線の見かけの検出効率は、厚いビスマス単結晶により、ビーム自体にはほとんど γ 線を含んでいないので確定した値が得られなかった。)

この、見かけの検出効率は IP ・ ND 自身の検出効率と、捕獲された中性子が PSL を作る効率(これを、発光効率 P とする)の重畠になっている。そこで、中性子の見かけの検出効率を、中性子検出効率で割る。ここから Gd と Li の、中性子による発光効率 P がわかる。 Gd と Li の発光効率の比は、 $P_{Li}/P_{Gd} \sim 100$ で、3.5の PSL と中性子検出効率だけから求めた値と比較して、ここでの値はいくつかの近似を仮定しているにもかかわらず、近い値が得られていると考えてよい。

γ 線についての発光効率はビスマスが厚いときは γ 線の入射強度が小さいため 6Li -IPでの ϵ^γ が精度よく求められなかつた。しかし、 γ 線の感知は中性子コンバーターを介さず、直接輝尽性蛍光物質と反応するため、 6Li -IPと Gd -IPでは γ 線の発光効率、検出効率はXray-IPと近い値を持つだろうと思われる。

4.3 中性子透過率

厚みが階段状になっている各種の物質を照射し、その像を IP - ND でとる。物質と厚みは各々、銅、ステンレス鋼、真ちゅう、亜鉛、鋼については5, 10, 15, 20, 25, 30mm、鉛、グラファイト、テフロンは、10, 20, 30, 40, 50, 60mmである(Fig.8)。これらの厚みの各部分の PSL を読み取り、計算値と比較した。

計算値は各物質の中性子散乱全断面積 σ_a 、単位体積あたりの原子数 N 、物質の厚さ t より、

$$PSL = PSL_0 e^{-N \sigma_a t} \quad (9)$$

でもとめた。

ただし、 PSL_0 は物質の厚みが0cmのときの強度で、これはバックグラウンドの平均値をつかうことで(9)式をフィッティングしてある。Fig.9は、 Pb の PSL の測定値と計算値をプロットしたものであり、(a)はビスマスのない場合、(b)は5cm

厚ビスマスがある場合である。

誤差が生じる理由は三つ考えられる。PSLは本来、入射中性子と γ 線とにそれぞれの検出効率と発光効率をかけたものの足し合わせからなっており(9)式は、

$$PSL = I_0^N E_f^N e^{-N\sigma t} + I_0^\gamma E_f^\gamma e^{-N\sigma t_\gamma} + PSL(n_\gamma) \quad (10)$$

となるはずで三つの理由のうちの二つはこの後ろの二つの項から由来する。すなわち本来はFig.6にあるように γ 線もやってくるため γ 線についても透過率をもとめて計算しなければならない。しかしあ線の、IP-NDにたいする発光効率がわからないので、この γ 線がどのくらいのPSLを作るかわからない。PSL(n_γ)は物質と中性子が相互作用して発生した γ 線がつくるPSLのことと、これも物質と、入射中性子のエネルギーに依存してエネルギーと強度が変化するので特定は難しい。もうひとつは多重反射効果で、これは物質が厚ければ厚いほど大きくなる。

以上から、物体の厚みがわかっているれば、その物体を構成する物質の種類、比率がかなり精度良くわかることが判明した。

§ 5. 今後の課題

IP-NDは γ 線も感知し、それはノイズの大きな割合を占め、S/N比を著しく劣化させる。しかし、IP-NDの γ 線に対する性質はよくわかっていないので、今後は、Gd-IP、⁶Li-IPのそれぞれの、 γ 線に対する検出効率と、発光効率、それから、 γ 線のエネルギー依存性を追及する必要がある。

次に、中性子と γ 線のそれぞれの発光効率、検出効率を比較しなければならないが、ノイズとしての γ 線のエネルギー分布が大きいので、中性子と同様の扱いをするのは難しい。

すでに述べてきたように、我々が開発を進めているIP-NDは、その予備的実験で得られたデータを見る限りにおいて、i) 中性子ラジオグラフィー、ii) 生体高分子単結晶中性子回折構造解析に応用できる性能を有していることが判明した。ただし、実用化を図るためにには、いくつかの検討を要する項目がある。この節でこれらについてまとめてみる。

5.1 中性子ラジオグラフィーへの応用

中性子ラジオグラフィーで最近期待されている課題の一つが、マウス及びラットの *in vivo* 中性子ラジオグラフィー撮像による、がんの診断である。がんにおける水構造は正常組織と異なることを利用して、中性子ラジオグラフィー撮像でがんの診断を行う手法である。

中性子ラジオグラフィー強度は(11)式で表現される。

$$I = I_0 \cdot B \exp(-N\sigma t) \quad (11)$$

ここで、 I_0 、 B 、 N 、 σ 、 t は、それぞれ入射中性子強度、ビルドアップ係数、試料の単位体積当たりの元素の数、試料の全断面積、試料の厚みである。 N 、 σ は、試料中の元素の種類が複数個ある場合は、各々につき和をとる必要があるが、ここでは近似的に平均値をとることにする。

水及び臓器(蛋白質)の $N\sigma$ は、 5.55cm^{-1} 、 3.84cm^{-1} である。いま仮に 3 cm 厚の生体があった時、その中で臓器の占める厚みを t_v とすると、中性子ラジオグラフィー強度は(12)式で表現される。

$$I = I_0 \cdot B \exp(-16.65 + 1.71 t_v) \quad (12)$$

ここで、 $I_0 \cdot B = 10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ とする。

ここで、次のような実験を想定する。3 cm 厚の生体中に 1.3 cm 厚の臓器を周囲の水から 1 % の誤差範囲で像を得るために測定時間 T を求めてみる。(12)式から 3 cm 厚の水の部分の強度は $I_w = 5.87 T \pm \sqrt{5.87} T$ 、1.3 cm 厚の臓器がある部分の強度は $I_t = 54.25 T \pm \sqrt{54.25} T$ 、よって臓器部分のみの測定強度の精度が 1 % 以下になるには、

$$\frac{\sqrt{5.87} T + \sqrt{54.25} T}{48.38 T} \leq 0.01$$

ただし、この値は、IP-NDの中性子検出効率が 100%とした時の値である (Fig.10)。加藤ら⁹⁾ は、20 sec の照射で臓器観測を試みているが、照射時間が約 20 倍不足している。

5.2 生体高分子単結晶中性子回折構造解析

生体高分子単結晶からの中性子回折によるブレック反射強度は、強いもので $5 \times 10^4 \text{ cts}/5\text{min}$ 、弱いもので $500 \text{ cts}/5\text{min}$ 位である。これを可能にするためには、現在の我々の IP-ND はまだ充分な性能を有していない。

- i) ダイナミックレンジの下限を 10^2 にまでする。
- ii) 5 分間のバックグランドを 20 cts 以下にする。
- iii) 中性子検出器効率を限りなく 100% に近づける。

以上の工夫が IP-ND になされることが重要である。

謝　　辞

当該実験を始めるに当たって、富士写真フィルム株式会社の宮原諄二氏と綿密な計画を練った。又、初期の実験では九州大学理学部の日高昌則博士、日本原子力研究所材料研究部の小泉智博士の援助を受けた。中性子ラジオグラフィーの測定においては日本原子力研究所研究炉部の鶴野晃氏、松林政仁氏の援助を受けた。IP-NDの読み取りにおいては高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の雨宮慶幸助教授、中川敦史博士の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) J. Miyahara, K. Takahashi, Y. Amemiya, N. Kamiya, Y. Satow ; Nucl. Instrum. & Methods A310 (1986) 572-578
- 2) C. Wilkinson, A. Gabriel, M. S. Lehman, T. Zemb, F. Né ; SPIE 1737 (1992) 324-329
- 3) C. Rausch, T. Bücherl, R. Gähler, H. v. Seggern, A. Winnacker ; SPIE 1737 (1992) 255-263
- 4) K. Okamoto et al ; Application of a CR-system to Neutron Radiography, Neutron Radiography, Kluwer Academic Publishers, (1989) 461-468
- 5) T. Bücherl, C. Rausch, H. v. Seggern ; Nucl. Instr. & Methods A333 (1993) 502-506
- 6) N. Niimura, Y. Karasawa, I. Tanaka, J. Miyahara, K. Takahashi, H. Saito, S. Koizumi, M. Hidaka ; Nucl. Instr. & Methods (to be submitted)
- 7) 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫、物理学選書7、放射線計測学（裳華房）(1972)
R. D. Evans, 'The Atomic Nucleus' (McGraw-Hill, New York, (1955))
- 8) 松本哲男；JAERI-Conf 94-002, 平成四年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会
報文集(1994)
- 9) 加藤一夫、松本元一；本シンポジウム

Table 1 The reaction of neutron converter elements.

核反応	放射粒子エネルギー(MeV)	
$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$	$\alpha : 1.47$	$^7\text{Li} : 0.83$
$^3\text{He}(\text{n}, \text{p})^3\text{H}$	$\text{p} : 0.57$	$^3\text{H} : 0.20$
$^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$	$\alpha : 2.05$	$^3\text{H} : 2.74$
$^{nat}\text{Gd}(\text{n}, \gamma)$	$\gamma : 0.3, 0.4, 1.2$	
$^{nat}\text{Gd}(\text{n}, \text{e})$	$e^- : 0.074, 0.034$	

Table 2 The flight path length of secondary particles from ^{10}B , ^6Li and Gd in photostimulated luminescence material.

$$\begin{aligned}
 ^{10}\text{B} & R_\alpha(1.47\text{MeV}) = 5.3\text{ }\mu\text{m} \\
 ^6\text{Li} & R_\alpha(2.05\text{MeV}) = 7.1\text{ }\mu\text{m} , R_T(2.74\text{MeV}) = 44.8\text{ }\mu\text{m} \\
 \text{Gd} & R_e(0.074\text{MeV}) = 23.7\text{ }\mu\text{m} , R_e(0.034\text{MeV}) = 5.6\text{ }\mu\text{m}
 \end{aligned}$$

Table 4 Thermal neutron and γ -ray contents when bismuth plates with several thickness are used.

ビスマスの厚さ(cm)	IPConverter	熱中性子の含有比	γ 線の含有比
0	Gd	40.1	16.4
5	Gd	72.5	0.4
10	^6Li	49.0	4.8
15	^6Li	53.7	4.9

Table 3 Specification of IP-ND used.

Converter	化合物	サンプルNo.	Converter比率 (モル比)	充填密度 (g/cm ³)	蛍光体層 (μm)	Efficiency(%) (λ=1.0 Å)
^{nat} Gd	Gd ₂ O ₃	G-0101		85	31.6	
		G-0102	GdO ₃	1.58	85*	31.6
		G-0103	Ba:Gd=50:50	BaFX(X:Br,I)	2.06	85**
		G-0104			130	31.6
		G-0105	Ba:Gd=90:10	Gd ₂ O ₃	0.28	44.0
		G-0106		BaFX(X:Br,I)	3.27	85
^{nat} Li	LiF	L-0101-A		LiF	0.31	6.5
	(Natural Abundance7.4%)	L-0102-B	Ba:Li=50:50	BaFX(X:Br,I)	2.78	130
						0.45
						190
						0.67

*保護層：ポリエチレンテレフタレート[約11 μm]

**保護層なし

(その他のサンプルの保護層はフッ素系樹脂[約3 μm])

大きさ 20×40cm

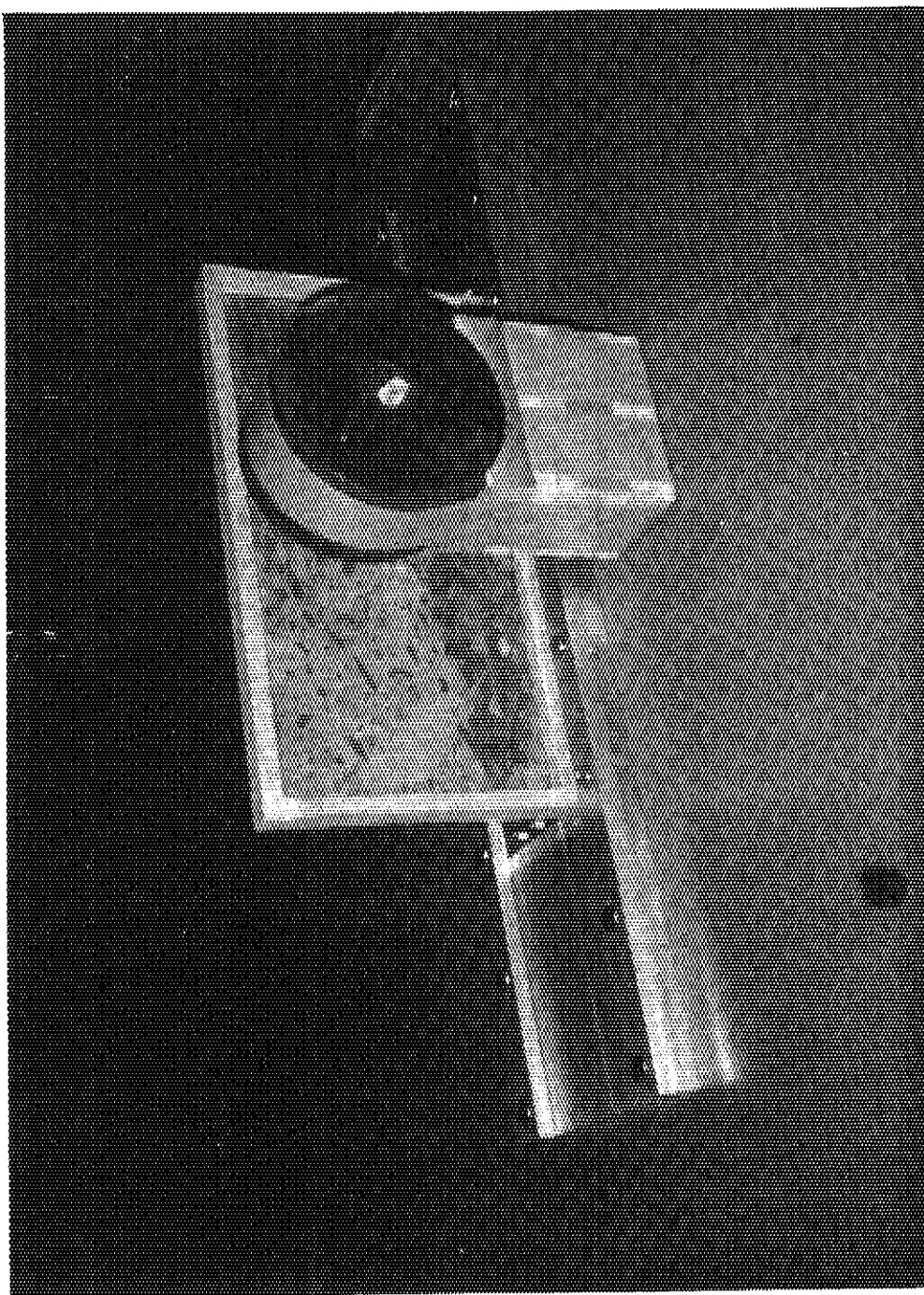


Fig. 1. Experimental configuration

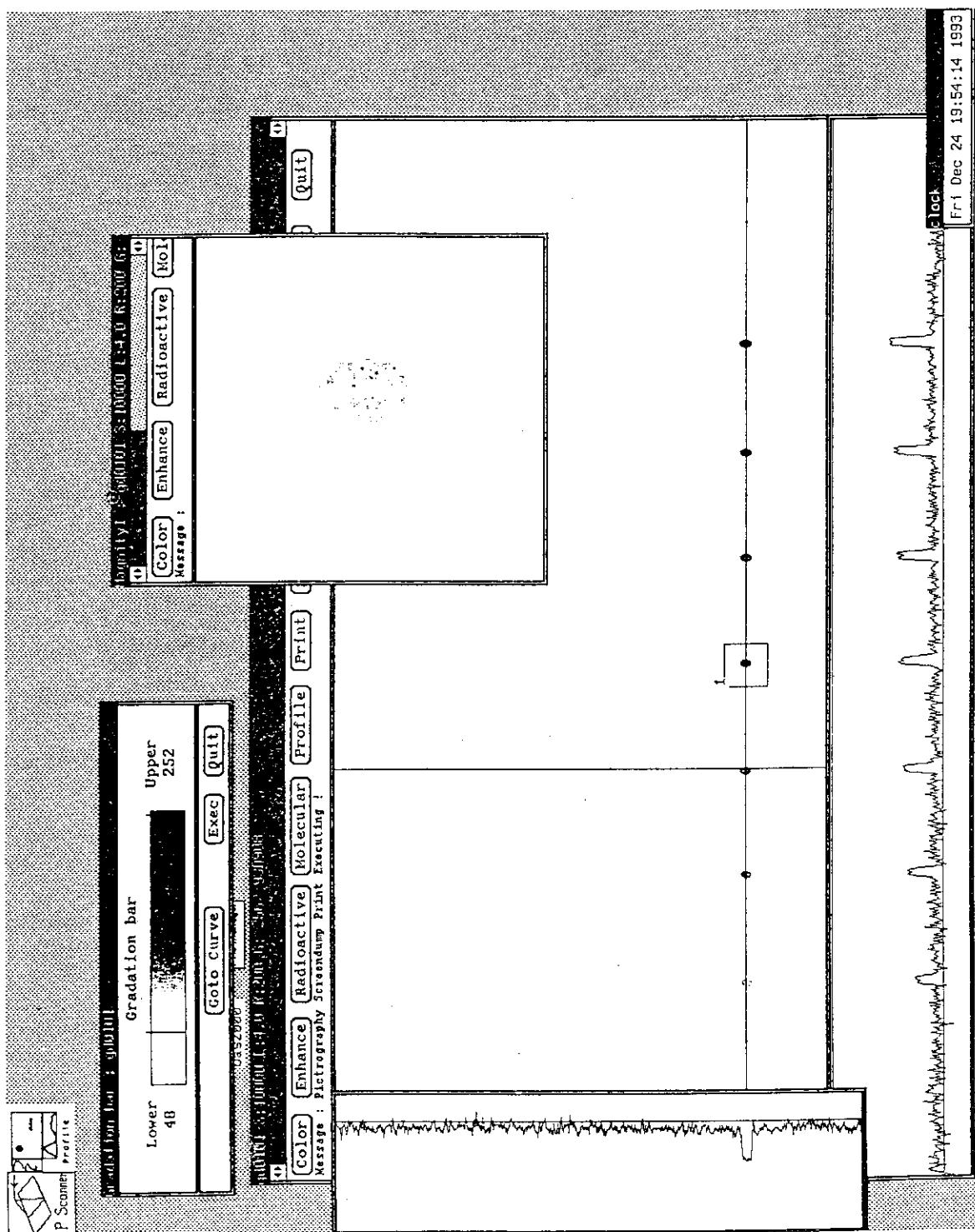


Fig. 2. An example of an image of neutron imaging plate

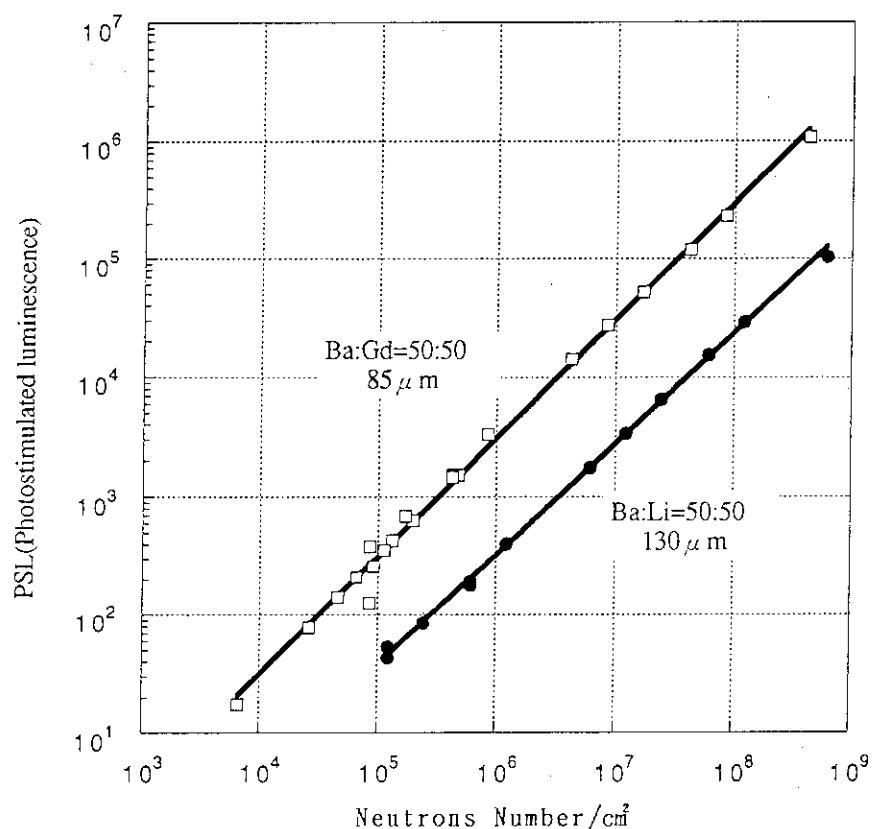


Fig. 3. The response of photostimulated luminescence (PSL) to the number of incident neutrons.

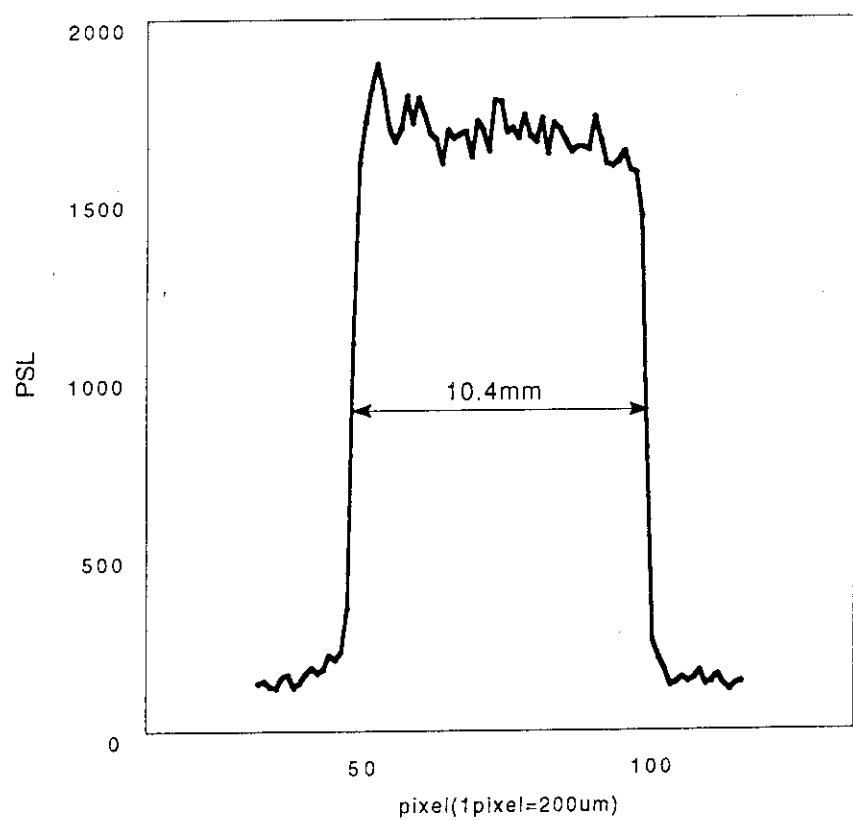


Fig. 4. An image profile of gap (10mm in width) defined by LiF ceramic plates.

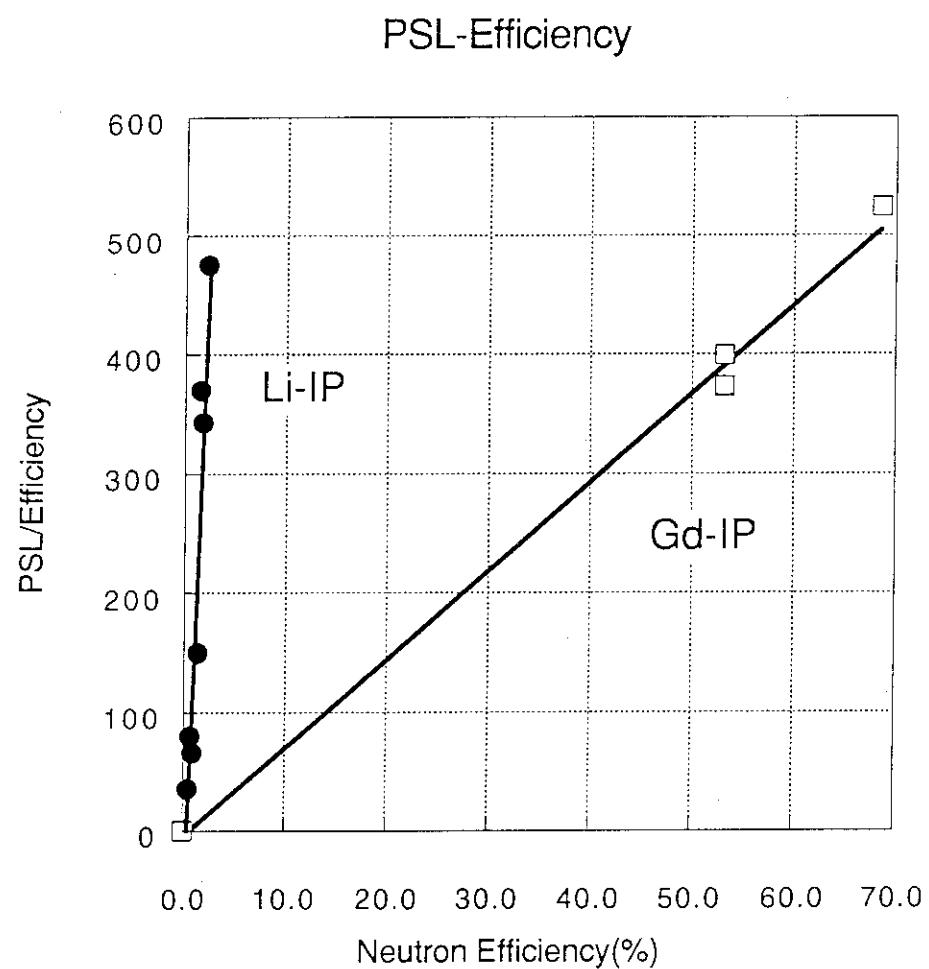
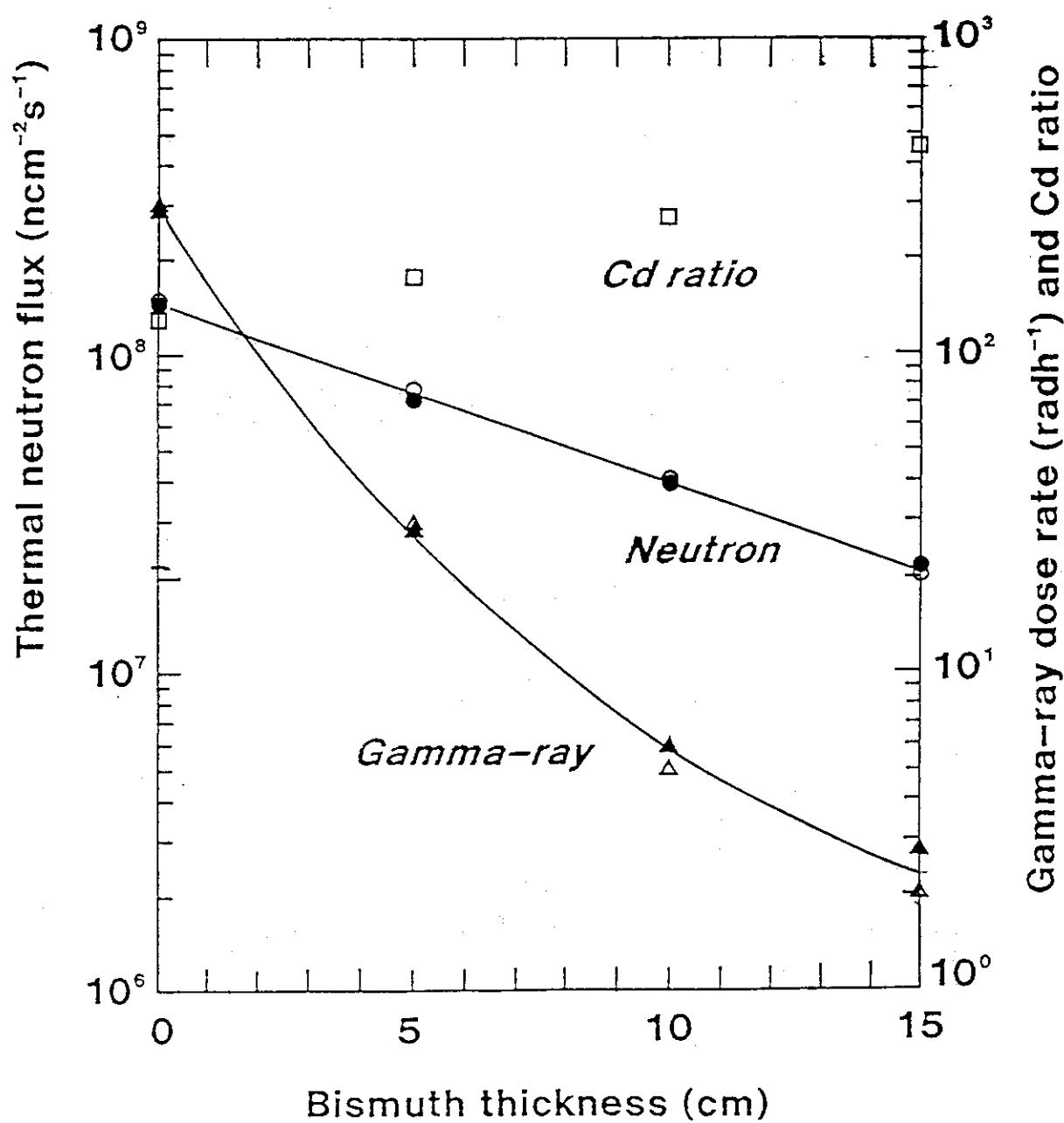


Fig. 5. The response of PSL to neutron efficiency .

Fig. 6. The neutron and γ -ray intensity to bismuth thickness.

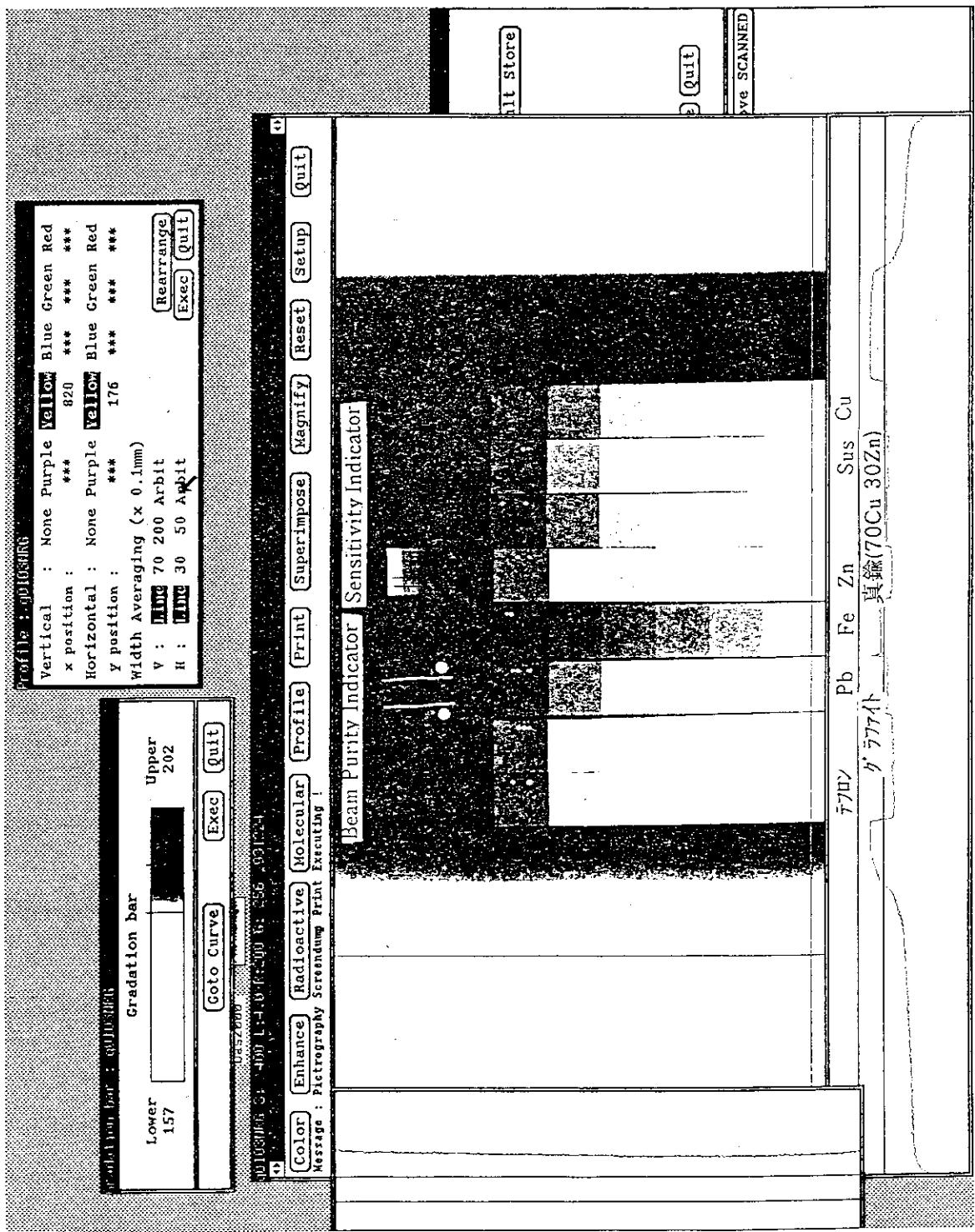


Fig. 7. The neutron radiography images of several standard samples.

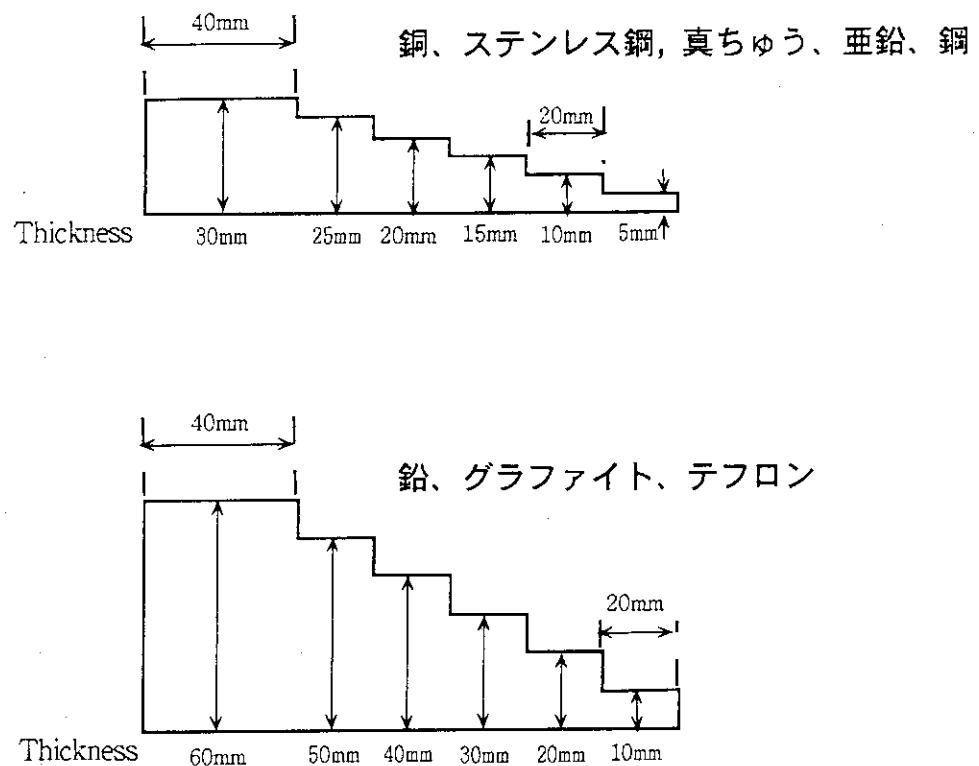
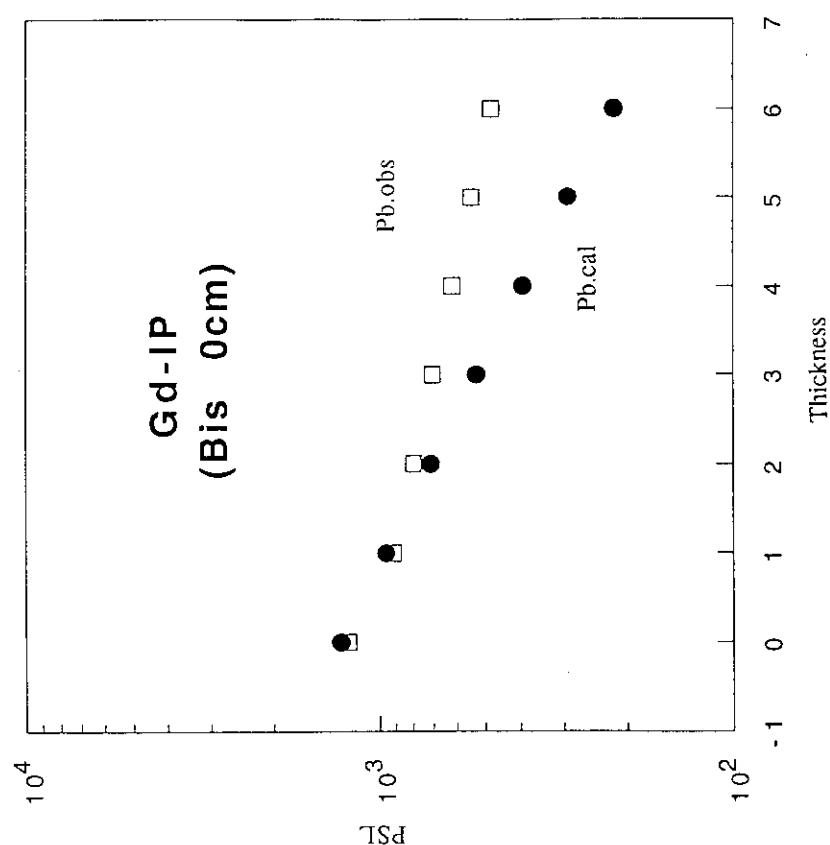
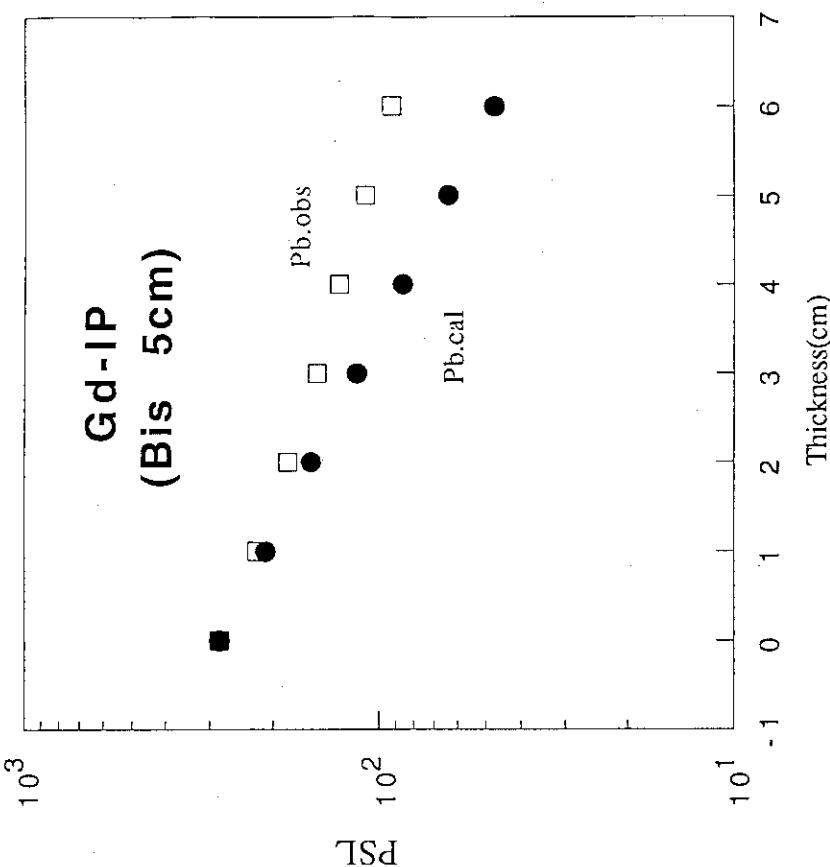


Fig. 8. The cross section of the tiered plates made of materials with different neutron transmission coefficients



(a)without bismuth filter



(b) with bismuth filter 5cm in thickness

Fig. 9. The lead thickness dependence of observed and calculated PSL.

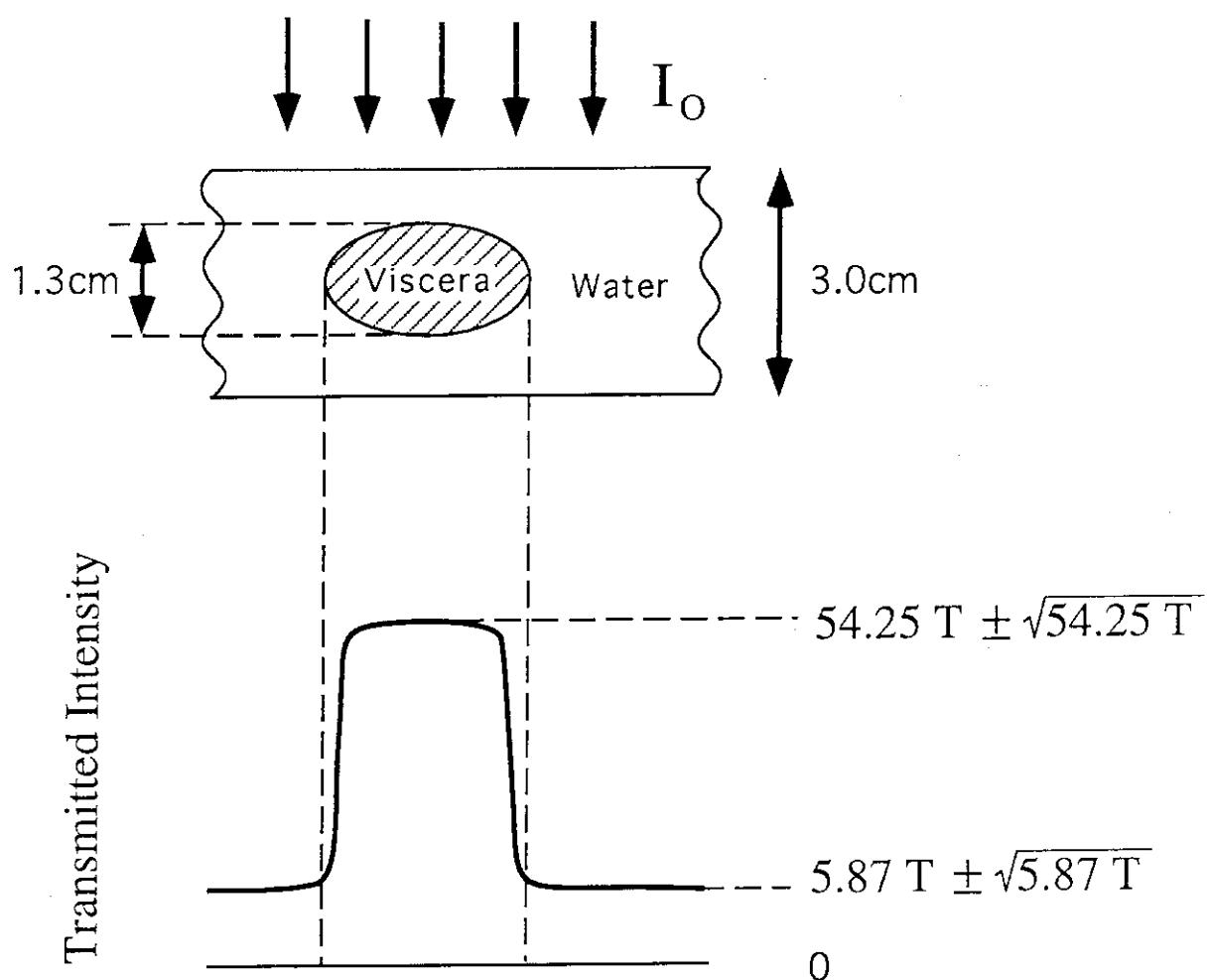


Fig. 10. The calculated neutron transmitted intensity from mouse's viscera.

3.4 実時間画像歪み補正法の開発

村田 裕、持木 幸一、田口 亮

武藏工業大学 工学部

1 はじめに

中性子ラジオグラフィにおいて、電子撮像法で得られる画像には何らかの歪が生じている。この画像歪は、単なる見た目の問題にとどまらず、被検体の寸法測定、中性子CTのための投影データの取得、さらに動画像における被検体の変形観測などの場合に大きな問題となる。歪補正の方法として、静止画像ではバッチ処理によるアフィン変換などがあるが、電子撮像法のメリットである実時間性が失われ、また、動態撮像の場合には、その場で歪みのない画像が求められている。

そこで、電子撮像法の中で撮像管を用いているシステムに適応できる実時間歪補正法を開発し、実用性が実証されたので以下に報告する。

2 歪補正原理の概要と撮像システム

電子撮像法で使用される撮像体系はFig.1のような組み合わせである。ここで、歪の原因となる要素は、光学レンズ、イメージインテンシファイア(I.I)内の電子レンズ、撮像管の偏向不完全、およびSIT管ではさらにイメージ増倍部における電子レンズなどが挙げられる。従って、一般にはこれらの複数の原因によって複雑な幾何学的画像歪が生じてしまう。武蔵工大のNRG研究グループでは、電動ズームレンズとSIT管の組み合わせが多用されているが、得られる画像には複雑な糸巻き歪が認められ、また、撮像視野をズームレンズにより変更する度に、歪のパターンが変化するのが現状である。

電子撮像系の各構成要素での画像の歪と走査パターンを示すとFig.2のようになる。ここでは、蛍光板上の正方格子を撮像した場合を示しているが、光学レンズの結像面ではすでに何らかの歪が発生しており、この像をCCDのように歪のない撮像素子で撮像しても、出力画像には歪が残ってしまう。また、偏向不完全の撮像管した場合には、さらに複雑な歪が発生する。

そこで、図に示されているように、撮像管において電子ビームの走査を歪に沿って行えば、結果として、歪の無い正方格子の出力画像を得られることが期待される。通常は電子ビームの走査に鋸歯状の偏向信号が使用されるが、この場合にはさらに歪に応じて補正信号を重畠されることとなる。武蔵工大が開発した静止画像処理装置(Mark-III)は、撮像管の偏向信号の波形をデジタル値で任意に設定でき、この機能を利用して実時間歪補正法を開発した。な

お、動画像の場合には、動画像処理装置 (MDIPS; Musashi Dynamic Image Processing System) が開発されており、同様の機能が付加されている。

今回使用した実時間歪補正システムは Fig.3 に示されているように、カメラ、アナログ信号処理装置、デジタル信号を扱う Mark-III、システムを制御するホストコンピュータ (エプソン社製の PC-286VG)、および高解像度モニタから成っている。なお、本来の NRG 実験では、SIT 管を使用するが、歪補正の原理の検証が主目的であったので、偏向形式が SIT 管と同じ電磁偏向型であるシリコンビジコン管を使用している。偏向信号である鋸歯状波のパターンと歪補正用のデータは Mark-III 内のメモリに格納される。ビデオ信号は AD 変換された後に画像メモリに蓄積され、ホストコンピュータに取り込まれる。なお、歪補正の過程では、後述されるように、取得された画像データに基づきホストコンピュータが歪補正に必要な計算をし、補正量を算出して、Mark-III 内のメモリに書き込む操作が繰り返し行われる。

偏向信号に関わる部分を更に詳しく示したもののが Fig.4 である。垂直用および水平用偏向信号の基本的な鋸歯状波のパターンは、各々のメモリに書き込まれており、ビデオ信号の AD 変換のタイミングを指定するピクセルロックに同期して順次読み出され、DAC を介して傾き一定の鋸歯状のアナログ電圧信号が生成される。歪補正是、画像を構成する個々の画素に 1 対 1 で対応して逐次施されるので、垂直用と水平用の歪補正データ用のメモリは、両者ともに画像メモリと同じ容量が用意され、垂直偏向信号と水平偏向信号の双方がメモリアドレスの指定に使用されている。このようにして読み出された歪補正データは DAC でアナログ信号に変換される。ここで、鋸歯状波用のデータは 11 ビットであり、歪補正データは 12 ビットとなっており、歪補正用のアナログ電圧信号は 1/16 に減衰された後に鋸歯状波に重畠され、カメラに送られる。また、カメラ内では電流信号に変換された上で、偏向コイルに送られている。なお、歪補正用のアナログ信号を減衰させるのは、補正の分解能を上げるためである。

本研究では、取得画像のピクセル数を 1024×1024 と設定しており、本システムにおける最大補正量は ± 128 ピクセル、補正分解能は ± 0.03125 ピクセルである。

3 画像歪補正

3.1 画像歪の分布測定

歪補正量を算出するために、画像歪がどのように画面上に分布しているか知る必要があり、次の方法によって取得している。まず、Fig.5 に示すような 8×8 のウィンドウの中心にドットを入れたドットパターンを 1024×1024 ピクセルの画面サイズで撮像する。ここで、各ウィンドウのサイズは、 128×128 ピクセルとなる。取得画像では、画像歪のために本来なら中心になるはずのドットがずれており、本来中心にあるべき正規のドット位置との差をずれ量として求めることができる。しかし、撮像したドットの像は数ピクセルにまたがって存在するため、撮像したそれぞれのドットの正確な位置を知ることができない。したがって、以下に述べる重心計算法によって各ウィンドウ内のドットの重心を求め、それをドットの位置としている。なお、

取得画像において、各ウィンドウのドット付近のラインプロフィールは Fig.6 のようになっており、回路雜音やシェーディング等の影響を除去した上で重心計算をする必要がある。そこで、まず各ウィンドウ内での最小輝度レベル I_{min} を求め、その値にあるオフセット値 I_{of} を加えたものを I_{th} とし、ウィンドウ内の各ピクセルの輝度が I_{th} 以上なら、そのピクセルの輝度の値を 0、 I_{th} よりも小さければ 1 に設定し、式(1)(2)に示す重心計算式により、ドットの重心座標 (Xg, Yg) を求めている。

$$Xg = \frac{\sum_{i=j}^{j+127} \left\{ \sum_{x=i}^{i+127} I(x, y) \times x \right\}}{\sum_{i=j}^{j+127} \left\{ \sum_{x=i}^{i+127} I(x, y) \right\}} \quad (1)$$

$$Yg = \frac{\sum_{i=j}^{j+127} \left\{ \sum_{x=i}^{i+127} I(x, y) \times y \right\}}{\sum_{i=j}^{j+127} \left\{ \sum_{x=i}^{i+127} I(x, y) \right\}} \quad (2)$$

ここで、

$$i=128 \times m, j=128 \times n$$

$$(m, n) : \text{ウィンドウ番号} \quad 0 \leq m, n \leq 7$$

である。

3.2 漸近法による歪補正の原理

本来のドット位置を (X_t, Y_t) とすれば、水平方向、垂直方向のずれ量 dx, dy は、Fig.7 より

$$dx = Xg - X_t \quad (3)$$

$$dy = Yg - Y_t \quad (4)$$

となる。ここで補正量は、このずれ量に比例し、符号が反対のものとする。しかし、実際には、アナログ加算部で補正量に 1/16 の精度を持たせるために、ずれ量を 16 倍したものが補正量となるので、水平方向、垂直方向の補正量 Cx, Cy は、

$$Cx = -16 \times dx \quad (5)$$

$$Cy = -16 \times dy \quad (6)$$

となる。

これらの補正量は、各ウィンドウの中心の 1 ピクセルについての補正量であるため、全画素分 (1024×1024) の補正量を求めるには、Fig.8 に示すように、隣接するドットの補正量からの線形補間によって求めることになる。また、ドットの外側の補正量は、端のドットと内側のド

ットの線形補間の延長によって求める。このようにして求めた歪補正量を歪補正用メモリに書き込み、鋸歯状波信号と足し合わせた上で、再度ドットパターンの撮像が行われる。

しかし、補正量を撮像管の偏向部の直交不完全性を考慮しないで求めたため、完全には補正されない。そこで、補正をかけた画像に繰り返し歪補正をかけ、それらを累積加算することにより、歪んだドットを正規のドット位置に近づけていくことにする。ここで、前の補正量に新たな補正量を加算するときに、係数 α ($0 < \alpha \leq 1$) を補正量にかけて加算することにする。

このようにして 2, 3, … 回繰り返して補正量を求めていく、 n 回目の補正量は水平、垂直それぞれ

$$C'x_n = C'x(n-1) + Cx_n \times \alpha \quad (7)$$

$$C'y_n = C'y(n-1) + Cy_n \times \alpha \quad (8)$$

となる。このように繰り返し補正していくことにより随時理想のドットに近づけていくことが期待できる。この様子を Fig.9 に示す。

ドット位置の算出(重心計算)、補正量の算出、線形補間、歪補正メモリへの書き込みは、すべて Mar k - III のホストコンピュータを用いて行うことができ、Fig.10 に示すフローチャートに従って、自動化が可能である。

4 実験結果

漸近法による画像歪補正の結果を次に示す。この時撮像した画像は、ラップトップ型パソコンのディスプレー上に映し出したドットパターンであり、視野は 10 cm × 10 cm の大きさで行った。また、実験はシステムを立ちあげてから十分な時間をとり、システムが安定してから撮像を開始した。

4.1 α 依存性

漸近法の繰り返しの係数 α を 1.0, 0.7 及び 0.4 にそれぞれ固定して、繰り返し歪補正を行った。この結果を Table 1 及び Fig.11, 12 に示す。補正結果を最大誤差、平均誤差で示しているが、誤差とは、本来あるべきドット位置(各ウィンドウの中心)と実際に重心計算により求めた位置の距離で表しており、何ピクセルずれているかを示している。

この結果を見ると、 α を 1.0 にして、つまり補正量をそのまま加算すると、はじめは速やかにずれ量が小さくなっていくが、誤差がある程度小さくなるとそれ以下にはならず大きくなってしまう。これは、 α が 0.7 でもいえることである。

この原因として、温度ドリフト等によるノコ波信号の変動、システムの不安定性による変動、補正量の影響(例えば、補正過剰など)が挙げられる。システムの不安定性については、時間を十分においてから撮像を行えばよいので、ここでは、補正量の影響が考えられる。従って、

α が 0.4 の時のように α 値を小さくすると安定した誤差の収束が行える。しかし、収束の速度は遅くなってしまう。

Fig.13 にドットの変動と誤差の推移を示す。これは、システムの安定性と誤差の変動について調べたものである。水平・垂直方向のドットシフトとは、繰り返し補正量を求める過程において、その都度補正量を加算せずに撮像したドットの重心を求めたものを撮像開始時と比較して、外側のウィンドウにある 28 ドットと、中央の 4 ドットを合わせて、32 ドットの変動の平均値をとり水平、垂直方向それぞれ何ピクセル移動したかを表している。垂直方向のドットシフトが 0 回目から 1 回目にかけて大きくずれているが、その後は水平方向と同様に一定であり、システム（ノコ波発生装置、アナログ信号処理装置）は、安定に動作していることが分かる。よって、収束していた誤差が再び大きくなってしまうのは、求めた補正量をそのまま足し合わせるために生じてしまうことが分かる。

Fig.14 は、Table 1、Fig.11,12 で示したデータの補正前の最大の誤差を持ったウィンドウ (7,7) の重心位置で、繰り返し補正をかけたときの推移を示している。これを見ると α が 0.7 の時は、ふらつくことなく速やかにドットの理想位置である (63,63) に近づく。 α が 1.0 の時は振動してしまい、 α が 0.4 では、確実に振動することなく理想位置に近づくが、収束速度が遅いことがわかる。

4.2 左合わせによる漸近法

カメラの走査ビームは、画面の左側から走査する。従って、左隅の歪補正量の小さい方が、安定して本来のドットの位置に収束しやすいと考えられる。そこで、 α を 1 に固定して、補正前のドットの位置の誤差を中心付近で合わせた場合と左で合わせた場合の誤差を比較した。この結果を Table 2 と Fig.15,16 に示す。

結果を見ると左合わせによる方が、最大誤差、平均誤差ともにかなり小さくなっている。これは、歪の分布と、その歪に伴う補正量の画面上の分布から考えることができる。補正をかける前に画面の中央付近で歪量が小さくなるようにドットパターンをセットすると、画面の中央から離れるに従って歪量が大きくなる。この状態で歪正を繰り返すと、走査ビームが歪量の変化の大→小→大に合わせて走査するため、理想位置に近いはずの画面中央付近のドット位置が左右の影響を受け振動してしまう。一方、左側で歪量が少なくなるように合わせると歪補正量が右方向に一定に変化するため、走査ビームも安定するのでし、安定した歪補正ができる。

4.3 α の値を変化させて繰り返し

繰り返し補正をかけるとき、 α の値を変化させながら行った。これは、撮像したドットが理想のドット位置に近づくにつれて、 α の値を小さくすることで漸近的に補正を行えると考えたからである。この時の撮像は、左側合わせで行った。その結果を Table 3 と Fig.17 に示す。

結果を見ると繰り返し補正をかけるごとに α の値を小さくしていくと、 α を 1.0 に固定するよりも安定に、 α を 0.4 に固定するときよりも速やかに収束することが分かる。

5 まとめ

繰り返し(漸近)法の確立を行い、その補正結果も最大の歪で 1 ピクセル強のずれ(歪率 0.1%)であり、十分満足できる結果が得られている。画像収集装置 (Mark-III) のホストコンピュータを利用して、歪補正データを求めることが出来るので、自動化が可能である。また、撮像現場で歪補正を行うことができ、視野の変化などにも速やかに対応できる方法である。

なお、今回は静止画像処理用の装置を用いて、方法の実証を行ったが、動画用処理装置 (MDIPS) にも同様のハード的機能があるので、動態観測の際に応用する事が可能である。また、今回は、カメラとしてシリコンビジョン管を使用したが、SIT 管でも同程度の補正性能が得られている。

【参考文献】

- 1) Y. Murata et al. ; "NEW ARCHITECTURE FOR NEUTRON RADIOGRAPHY AT THE MUSASHI REACTOR", Neutron Radiography (3), pp469-478 (1989).
- 2) 峰松史明 ; “画像歪補正に関する研究”, 平成 2 年度 武藏工業大学修士論文.
- 3) 二宮・長谷川・和久井 ; 撮像工学、コロナ社 (1978).

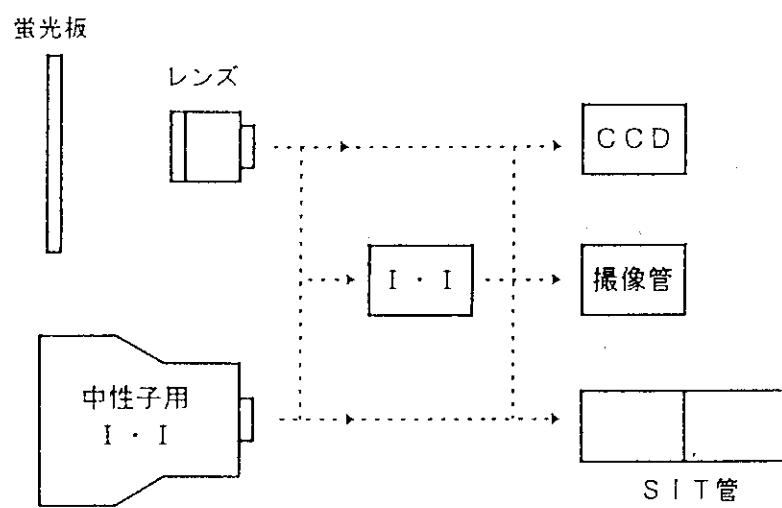


Fig.1 中性子ラジオグラフィにおける電子撮像系の組み合わせ

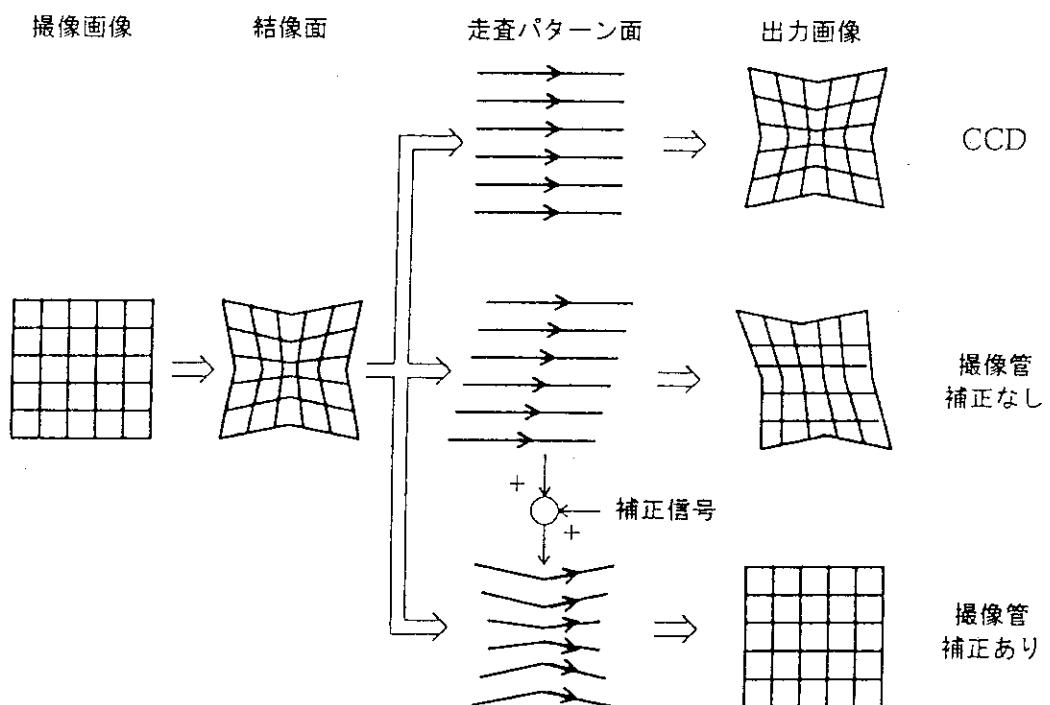


Fig.2 撮像管を利用した歪補正の原理

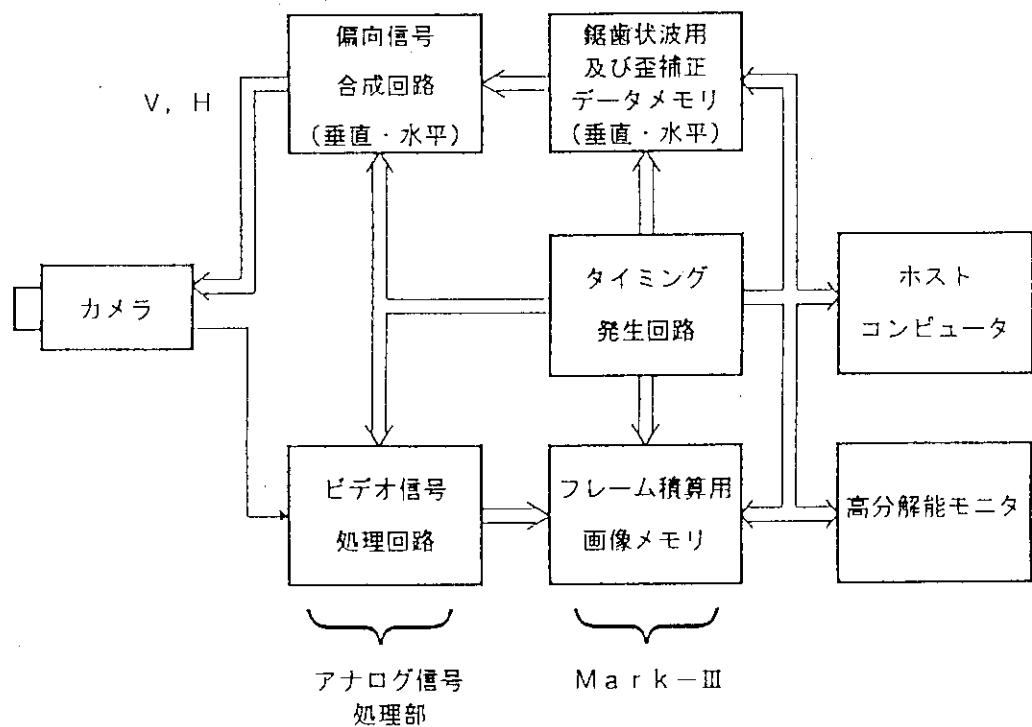


Fig.3 実時間歪補正システムのブロック図

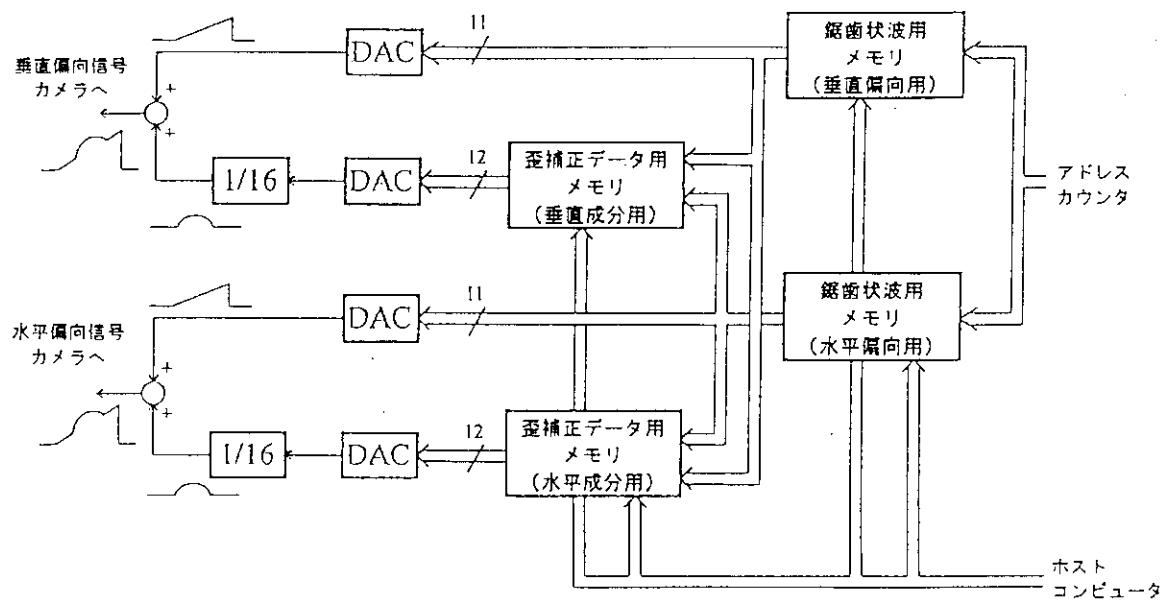


Fig.4 実時間歪補正システムの詳細ブロック図

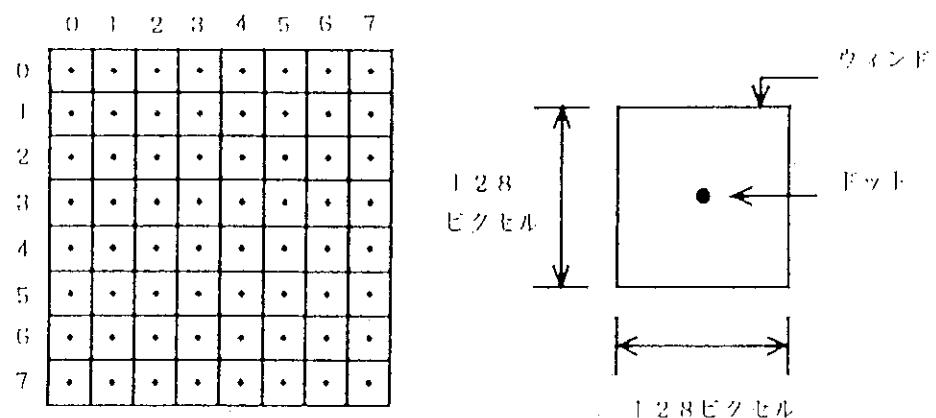


Fig.5 ドットパターン

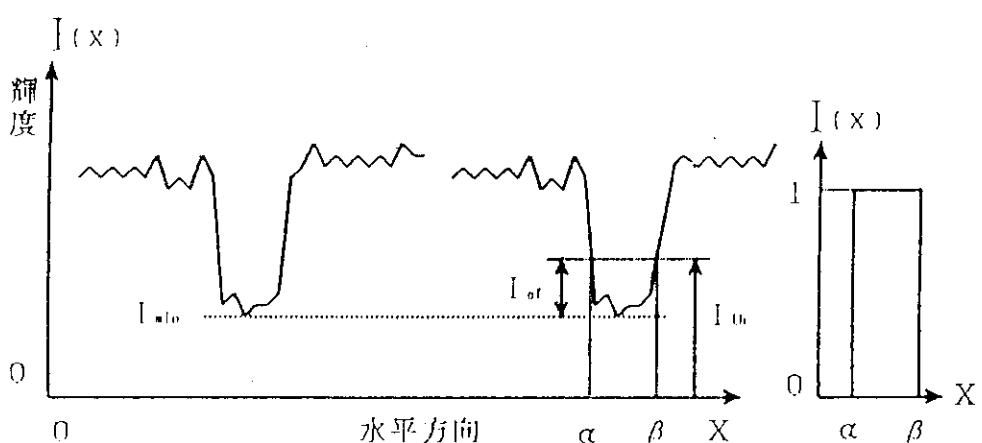


Fig.6 重心計算のための輝度変換

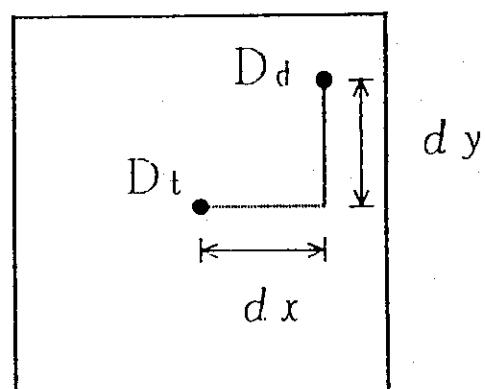


Fig.7 ずれ量の測定

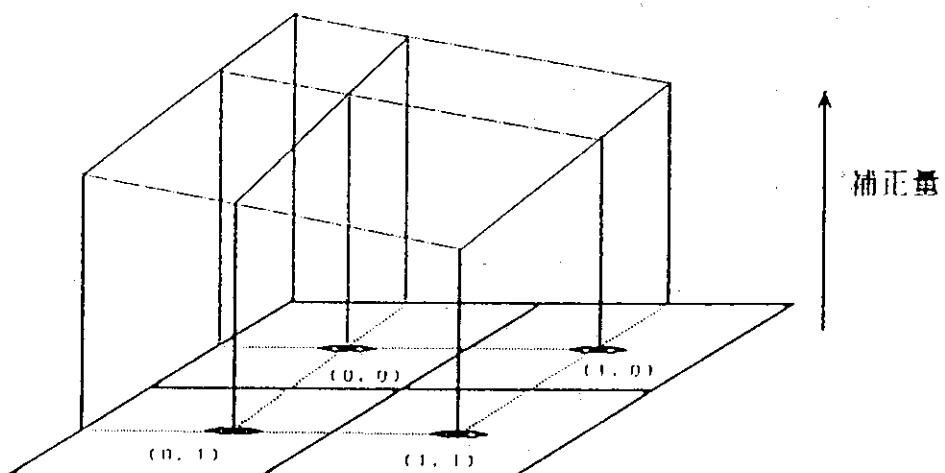


Fig.8 線形補間

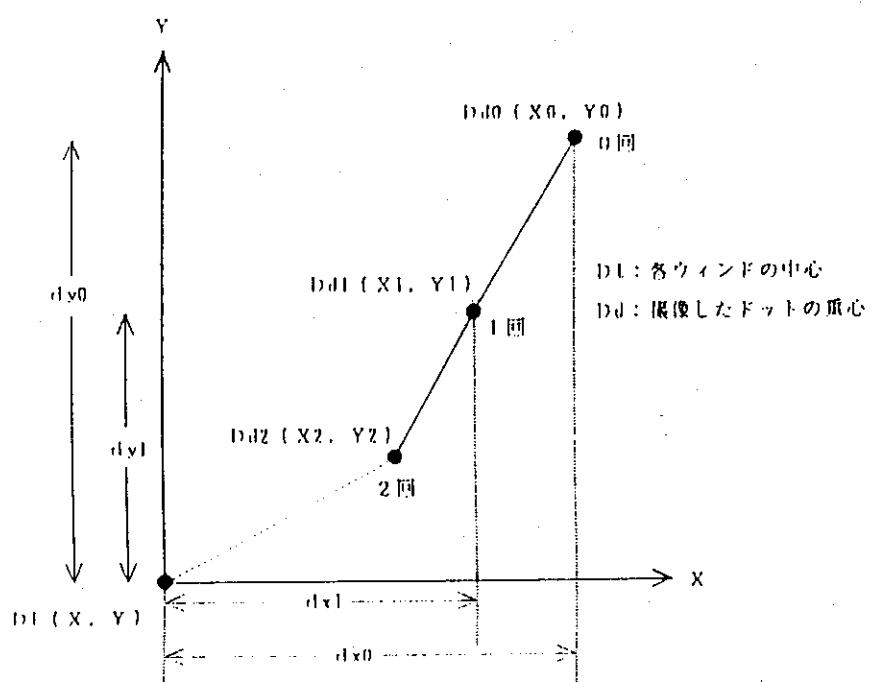


Fig.9 繰り返し(漸近)法によるドットの収束

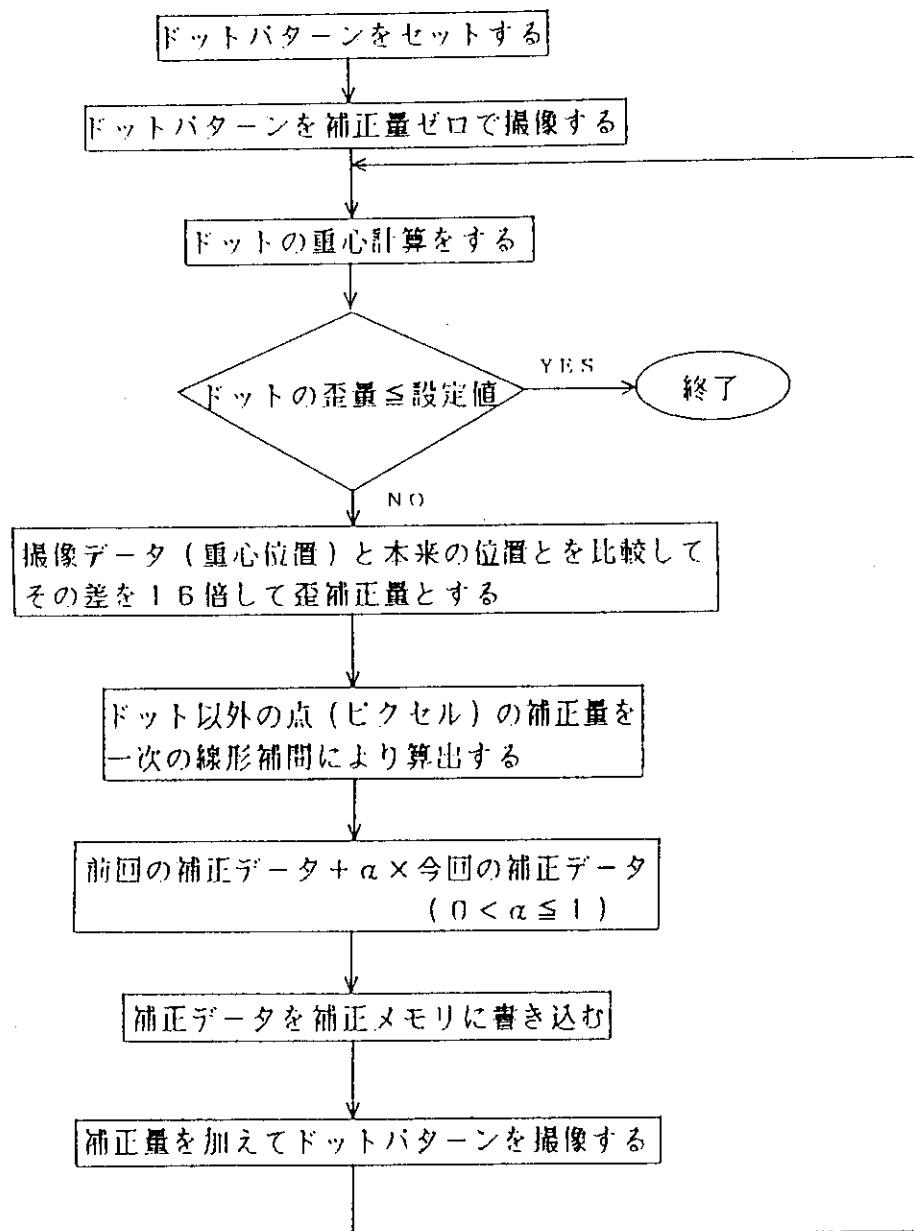
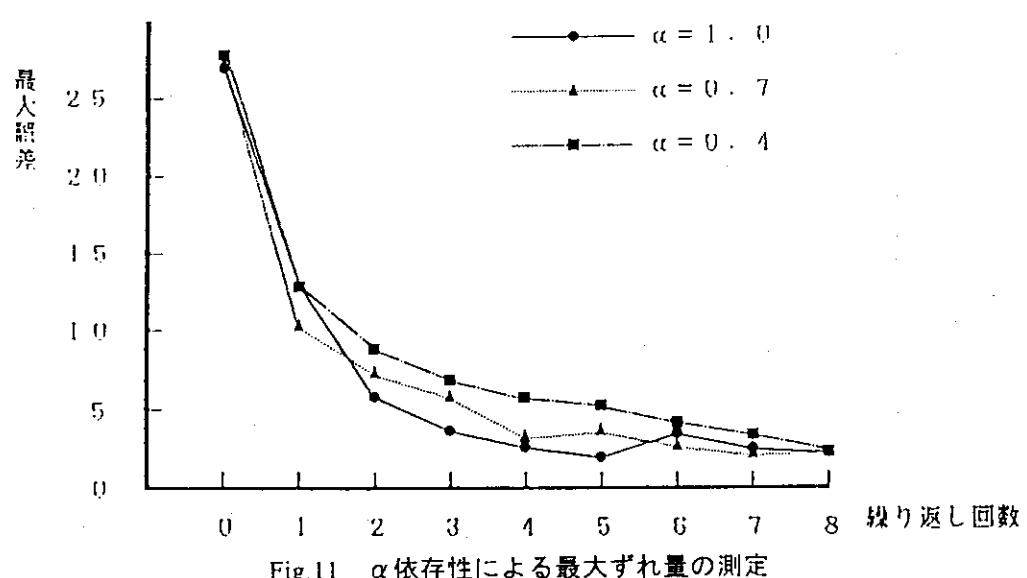


Fig.10 繰り返し法流れ図

Table.1 α 依存性

α 値		1 . 0	0 . 7	0 . 4
補正無し	最大誤差	26.93	27.23	27.93
	平均誤差	10.52	11.10	10.72
8回補正後	最大誤差	2.27	2.47	2.47
	平均誤差	1.00	1.01	1.09

Fig.11 α 依存性による最大ずれ量の測定

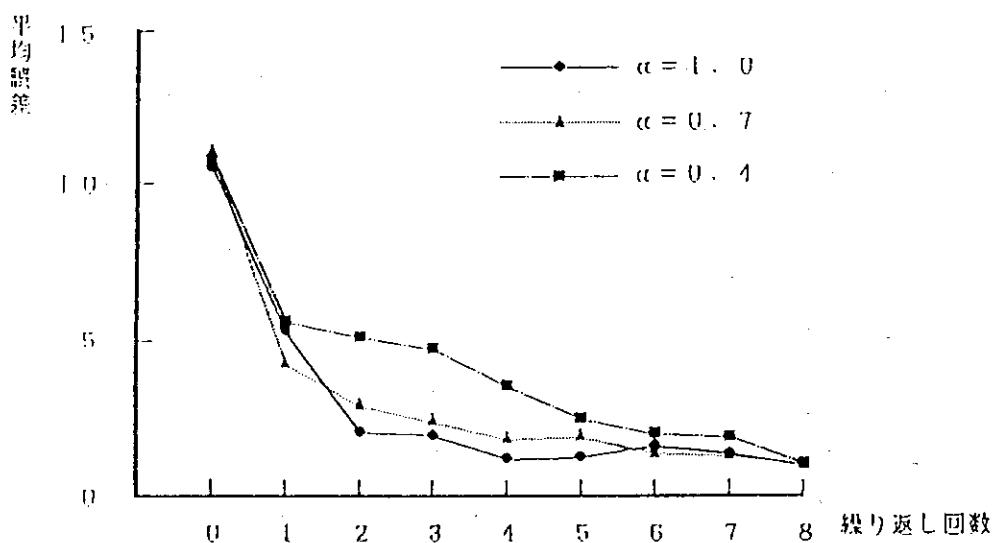
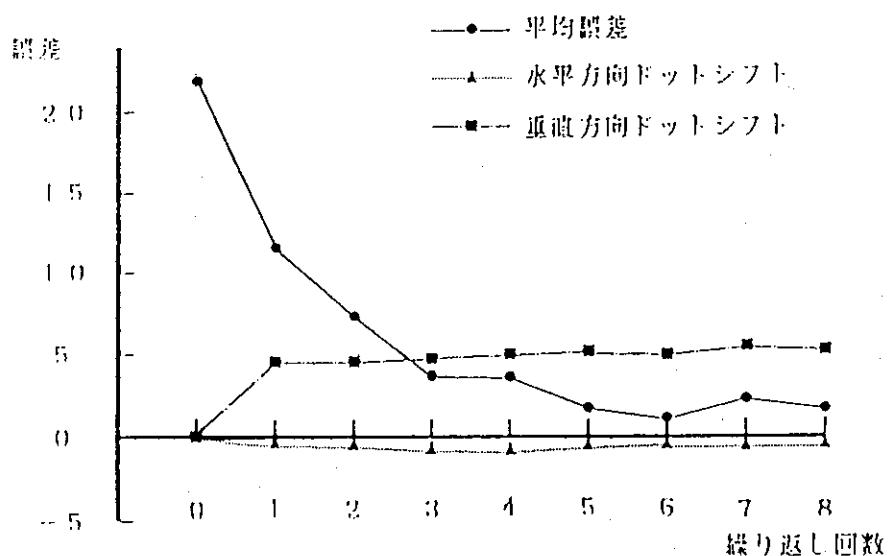
Fig. 12 α 依存性による平均ずれ量の推移

Fig. 13 システムの安定性と誤差の変動

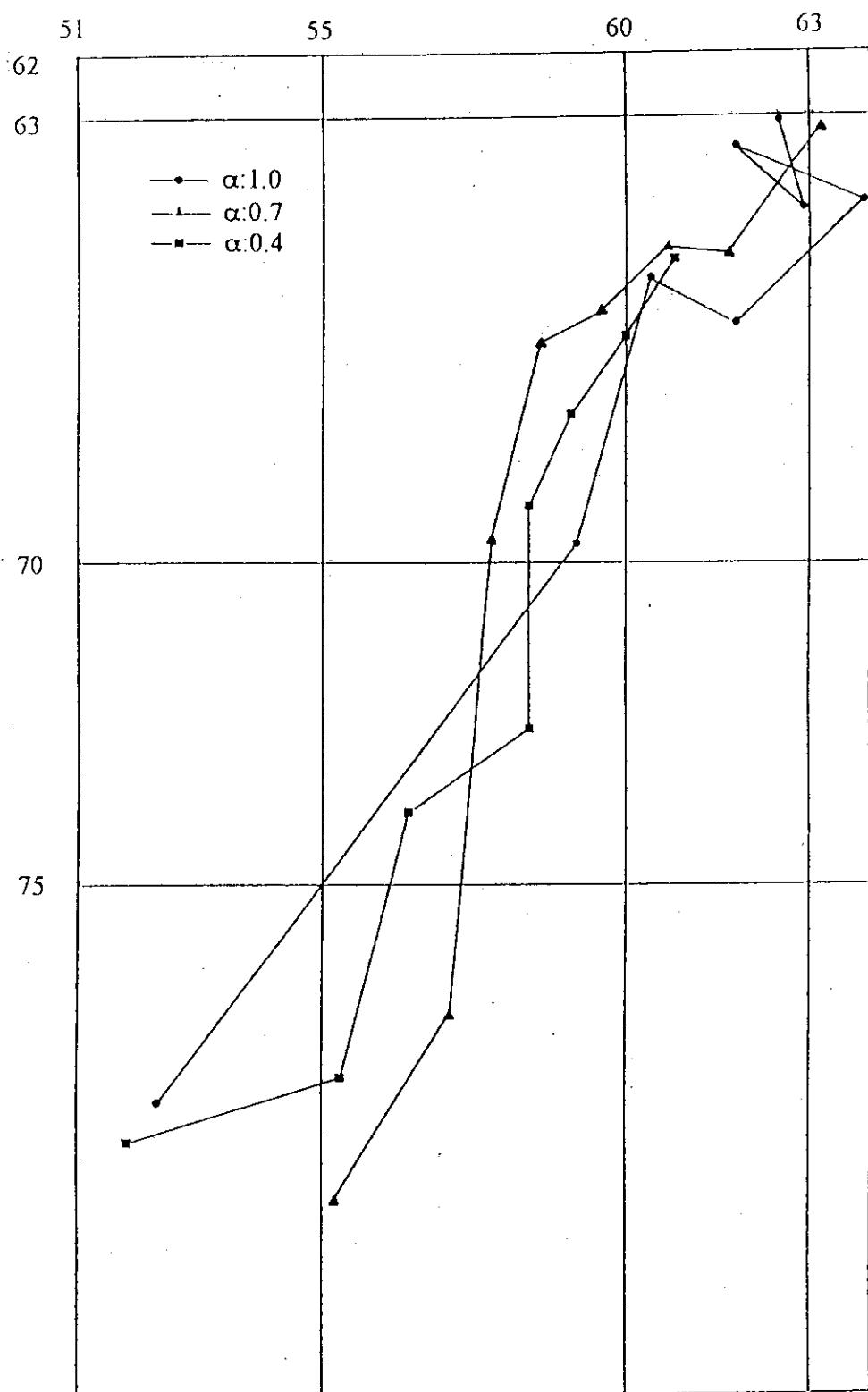
Fig.14 α の変化による収束の度合い

Table.2 α 左合わせ

$\alpha = 1, 0$		中心合わせ	左合わせ
補正なし	最大誤差	26.93	26.96
	平均誤差	10.52	13.84
8回補正後	最大誤差	2.27	1.55
	平均誤差	1.00	0.68

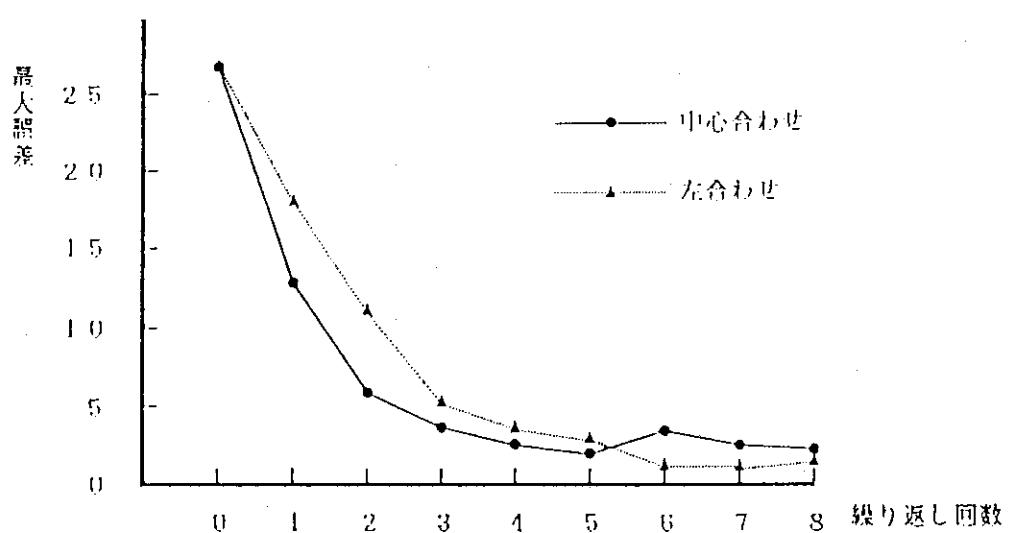


Fig.15 左合わせ最大誤差

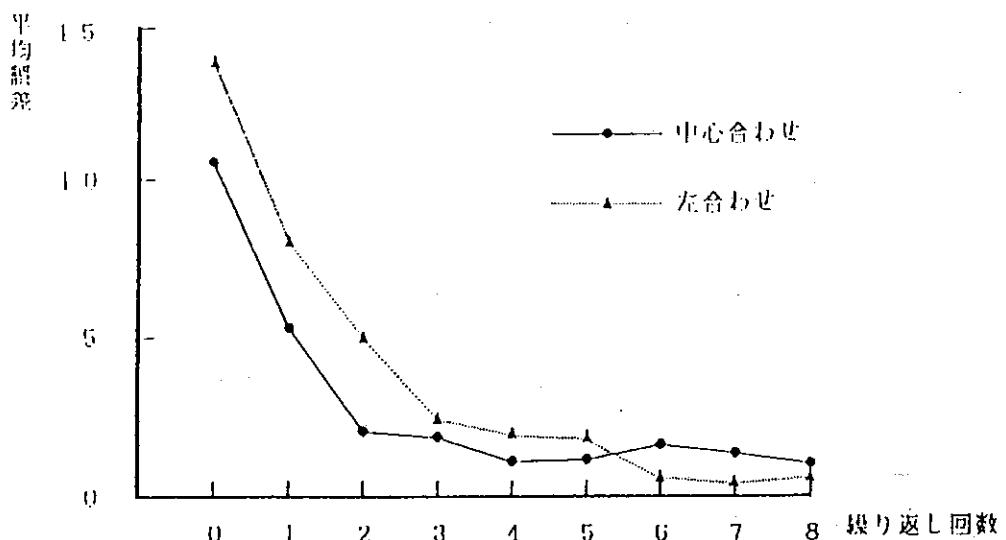
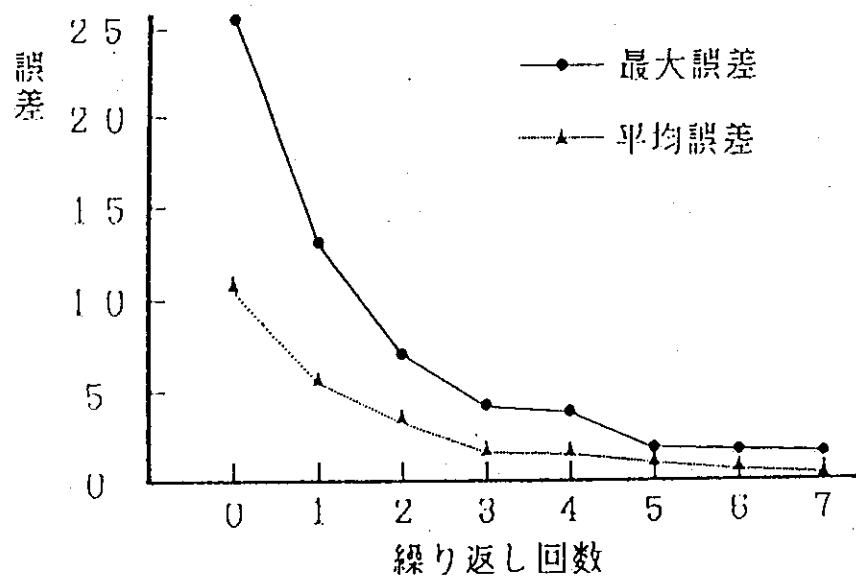


Fig. 16 左合わせ平均誤差

Table.3 α の値を変化させて繰り返し

繰り返し回数	0	1	2	3	4	5	6	7
α 値	補正なし	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.4	0.4
最大誤差	25.49	13.35	7.11	4.35	3.59	1.91	1.72	1.52
平均誤差	10.93	5.74	3.60	1.81	1.78	1.18	0.80	0.51

Fig. 17 α を変化させたときの誤差の推移

3.5 ミシガン大学における中性子ラジオグラフィの研究

松林 政仁

日本原子力研究所 研究炉技術開発室

1. はじめに

ミシガン大学の北キャンパスにPhoenix Memorial Laboratory（以下、PMLという。）があり、当 Laboratory内にFord Nuclear Reactor（以下、FNRという。）が設置されている。FNRは熱出力 2 MW の 軽水減速・冷却のスイミングプール型研究用原子炉で、中性子ビーム実験、放射化分析、放射性同位元素の生産、材料照射等に利用されている。¹⁾ Fig. 1にFNRの鳥瞰図を示す。PMLでは、J. T. Lindsay 等がFNRを利用して中性子ラジオグラフィ装置の開発及び応用研究を積極的に行っている。^{2), 3), 4), 5), 6)}

FNRの中性子ラジオグラフィ装置は、炉頂部に撮影位置を持つ垂直実験孔施設と炉室 1 階の水平実験孔施設とからなる。Fig. 2に垂直実験孔施設の断面図をFig. 3に水平実験孔施設の断面図を示す。垂直実験孔施設は、熱中性子を炉心北側に取付けられている重水タンクより取り出しており、高コリメータ比（高分解能）がその特徴である。さらに実験孔の先端が炉心を直接覗いていないため、十分に減速された中性子のみが取り出されており、ガンマ線の混入も少ない。欠点としては、中性子ビームのサイズが小さいため照射野が小さく、撮影できる試料の大きさが限定されることである。垂直実験孔施設では、高分解能を生かしたフィルム法を用いた撮影が一般的である。一方、水平実験孔施設は垂直実験孔施設と同じく熱中性子を重水タンク中より取り出しているが、実験孔の先端部が炉心を直接覗いているために減速されていない炉心からの中性子の割合も高く、ガンマ線の混入も多い。長所としては、コリメータ比を犠牲にして照射野を広く取ったことである。このため撮影試料としては、比較的大きいものまで取り扱えるようになっている。水平実験孔施設では、フィルム法を用いた撮影も行われるが、主にテレビ法を用いた研究に幅広く利用されている。

ミシガン大学留学中は、「エポキシ樹脂接着剤中における水の拡散に関する研究」を主テーマとして実験を行った。この実験は、現在もJ. T. Lindsayにより継続されている。

2. エポキシ樹脂接着剤中における水の拡散に関する研究

2.1 研究目的

ポリマー材中における水の拡散特性については、これまで数多くの研究がなされてきており、実験方法も種々開発されてきている。これらの研究の大部分は、各種ポリマー材について時間、温度、圧力またはポリマー材の厚さを変数とした場合のポリマー材中における水の拡散特性を調べるものであつ

た。^{7), 8), 9), 10), 11), 12), 13), 14), 15)} またその中で、試料中の水の拡散を2次元的に扱っているものは少数であり、実験で用いられるポリマー材の試料も各実験方法に適するよう形状が制限されていた。¹⁶⁾ 例えば、薄膜状、シート状または板状等である。このため、実際にはその他の物質と組み合わされて色々な形状をとるポリマー材に、実験結果をそのまま適用するのは現実的でなかった。この研究では、ポリマー材の内、自動車のドア部分の鋼板接合部に接着剤として用いられているエポキシ樹脂接着剤を対象とし、試料の形状を実際の使用状態と同じになるようにした。

エポキシ樹脂は比較的低分子のポリマーで、一般に接着性、含浸性、寸法安定性、耐水性、耐薬性が良く、特に電気絶縁性に優れ、接着剤、塗料、積層材等様々な成形品、IC等の半導体封止用樹脂として用いられている。¹⁷⁾ 一部のエポキシ樹脂は、自動車のドア部分の鋼板接合部に接着材として用いられており、その耐水性により外部から水がドアの内部に浸入するのを防止する役目も担っている。ドアの内部に水が浸入するとドアの内部に腐食が発生する可能性は高くなる。このような水の浸入による腐食を防止するためには、外部からの水の浸入に対して防護壁となっているエポキシ樹脂接着剤中における水の拡散特性を知ることが重要である。自動車のドアの場合、エポキシ樹脂接着剤は2枚の鋼板を接着している。このため水に曝される可能性のある表面は、鋼板に挟まれ接着されている表面を除く極く限られた部分のみである。このような条件下では、水はエポキシ樹脂接着剤中を拡散してドア内部へ浸入すると考えられる。この研究では中性子ラジオグラフィを用いてエポキシ樹脂接着剤中の水の拡散の状態を2次元的に調べることを目的とした。

2.2 実験材料

この実験で用いた試料は2個のアルミニウム片とエポキシ樹脂接着剤からなる。試料はドアの接着部を簡略化して模擬するために、エポキシ樹脂接着剤がアルミニウム片の間に挟まれた形状にした。アルミニウムは中性子の吸収係数が小さいことから試料の材料として用いた。Fig. 4に試料の概略図を示す。使用したエポキシ樹脂接着剤は、市販品のMASTER MEND EPOXY (Locite Corporation) 及び5Minute Epoxy (Devcon Corporation) の2種類である。アルミニウム片は、直径19.05 mmのアルミニウム棒材 (A6061) から切り出し、高さは約12 mmであった。最初に2枚のアルミニウム片の接着面を紙やすりで軽くやすり掛けした後、エポキシ樹脂接着剤で接着した。エポキシ樹脂接着剤は室温で16 h接着放置した後、真空オーブン中で60 °Cで50 h、40 °Cで117 h硬化させた。硬化終了後、試料を室温で一晩冷却させ、余分な接着剤はやすりで取り除いた。浸水実験に先立ち、試料の接着状態を確認するために、製作したすべての試料について中性子ラジオグラフを撮影した。拡大鏡を用いた目視検査により、実験上接着剤中に混入したボイド量が無視できる試料のみを選択した。この結果、浸水実験に用いた試料は2種類のエポキシ樹脂接着剤について各6個となった。

2.3 実験方法

熱中性子は、物質中の原子の原子核と相互作用をおこすが、この相互作用は原子核の構造に大きく依存している。水素の場合を例にとると、その大きな散乱断面積により熱中性子は減衰され、その結

果、水素化合物の分布は熱中性子束分布の変化として捉えることができる。中性子ラジオグラフィは、物質の内部情報をその物質を透過してきた中性子束の分布として2次元的に得る非破壊検査技術である。物質中における中性子の減衰は複雑な過程であるが、物質の組成が既知の場合には減衰率を推定することは可能であり、逆に減衰率の変化から組成の変化を推定することも可能である。この実験では中性子ラジオグラフィを用いて、中性子束の変化量から試料中に浸入した水の等価厚さを求める方法を用いた。中性子は試料中の各構成物により減衰されるが、同一試料において浸水前と浸水後の試料による中性子の減衰率を比較すると、その違いは試料中の構成物の変化に起因するものと考えることができる。本実験の場合、浸水による試料の寸法の変化が無視できると仮定すると、試料中で大きく変化したものはエポキシ樹脂接着剤中の水分量である。具体的には、エポキシ樹脂接着剤中に浸入した水の総量は試料の重量測定により推定し、エポキシ樹脂接着剤中の水の分布は中性子ラジオグラフを撮影して画像解析により求めることとした。重量測定には、Mettler Analytical Balanceを使用した。Mettler Analytical Balanceの測定精度は、0.1 mgである。水の拡散は、浸水時間及びエポキシ樹脂接着剤中の位置の関数として求ることとした。

この実験ではFNRの垂直実験孔施設を利用して試料の中性子ラジオグラフを撮影した。中性子ビームは直径71 mm、熱中性子束 2.3×10^6 (n/cm²·s)、コリメータ比340である。

2.4 実験手順

浸水実験に先立ち、試料を試料中の水分量が最小になるよう真空オープン中で乾燥させた。試料は、乾燥状態で重量測定を行なった後、室温の脱イオン水に浸水させた。その後試料は、積算浸水時間が0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100, 200 hに達した時点で、水槽から取り出し、ペーパータオルで余分な水分を拭きとり、重量測定した。

重量測定後、試料の中性子ラジオグラフを撮影した。中性子ビームと試料の配置は、中性子ビームが試料の接着面に対して垂直に入射するようにした。Fig. 5に撮影配置を示す。この配置では、接着剤の厚み方向の水の分布に関する情報は得られないが、水の拡散の状態をエポキシ樹脂接着剤全域にわたって2次元的に確認することができる。撮影時間は45 minで、Kodak SR フィルムと25 μm厚のガドリニウムコンバーターの組み合わせで撮影した。中性子ラジオグラフ撮影後、撮影中における水分量の変動を確認するため再度試料の重量測定を行なってから浸水を継続した。撮影済のフィルムは現像し、走査型微小濃度計により輝度値を測定する。当初は、PMLの画像処理システムを用いてフィルム上の画像を簡易型のシャーカステンとCCDカメラの組み合わせでコンピュータ上に読み込み、輝度値を測定することとしていた。しかし当画像処理システムのデジタイザーボードの能力が8 bitであり、本実験のような微小な輝度値の変化の解析には処理能力が不足していると考えられることから、JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置に装備されている走査型微小濃度計で測定することとした。

2.5 結果及び考察

浸水実験は、留学期間に200 hまで終了した。実験結果の解析は、200 hまでの浸水実験について

JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置に既設の画像処理装置等を用いて現在進行中である。

2種類のエポキシ樹脂接着剤の試料各1個について200 h 終了までの重量測定の結果をFig. 6及びFig. 7に示す。各グラフにおいては、試料重量の変化量は浸水前（積算浸水時間0 h）の試料重量との差として表示されている。Fig. 6及びFig. 7ともに試料重量が撮影前と比較して、撮影後に減少していることを示している。これは中性子ラジオグラフ撮影中における試料からの水の蒸発が原因と考えられるが、積算浸水時間に対する試料重量の変化傾向に大きな影響を与えるものではないことが分かる。また、Fig. 6の試料及びFig. 7の試料の浸水前（積算浸水時間0 h）及び積算浸水時間200hの時に撮影した中性子ラジオグラフの画像をFig. 8並びにFig. 9に示す。これらの画像はPMLの画像処理システムを用いてコンピュータ上に読み込んだ画像データを256階調のグレースケールでピクトログラフィにより出力したものである。画像中の黒い塊の部分は、エポキシ樹脂接着剤中に生じたボイドであり、白い点の部分はフィルム上の傷である。これらの画像では中性子が透過しやすい部分が黒色で表され、透過しにくい部分が白色で表される。画像上では判別しにくいが、フィルム上の画像では試料の縁の円周と同心のリングが縁の内側に観察できる。定性的には、縁の方から水が内部に浸透していったために生じたものと考えられるが、定量的な判断を行うためには全浸水実験終了後に画像解析が必要である。

3. おわりに

本留学中に実施した「エポキシ樹脂接着剤中における水の拡散に関する研究」は、中性子ラジオグラフィを用いた発展性のある応用研究である。エポキシ樹脂あるいは水を他の材料に置き換えることにより、中性子ラジオグラフィを用いた研究の応用範囲が広がることが期待できる。

4. 謝 辞

本研究にご協力頂いたミシガン大学 Dr. J. T. Lindsay 及びPMLへの受入を許可して下さったDr. R. F. Flemingに感謝します。また本研究は平成4年度原子力関係在外研究員派遣制度によりミシガン大学に留学した際に行ったもので、留学の機会を与えて下さった研究炉部白井英次部長及び研究炉技術開発室古平恒夫室長並びに留学中にJRR-3M中性子ラジオグラフィ装置の開発研究を一人で続けて頂いた研究炉技術開発室鶴野晃氏に感謝します。

参考文献

- (1) R. R. Burn : " The U of Michigan's Ford Reactor and Phoenix Lab: Benefiting humankind ", Nuclear News, June (1993).
- (2) J. T. Lindsay, J. D. Jones, C. W. Kauffman, and B. V. Pelt : Nucl. Instru. Methods Phys. Res., A242, 525 (1986).
- (3) J. T. Lindsay, J. Jasti, H. S. Fogler, and C. W. Kauffman : " Neutron Radiography Applications at the University of Michigan, Phoenix Memorial Laboratory ", NEUTRON RADIOGRAPHY (3), Fujine S., et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1990).
- (4) J. T. Lindsay : " The MTF Methods for Neutron Radioscopy Imaging System Characterization ", NEUTRON RADIOGRAPHY (4), J. P. Barton (eds), Gordon and Breach Science Publishers, Yverdon (1993).
- (5) B. P. Tullis, J. T. Lindsay, and S. J. Wright : " The Imaging of Wetting Front Instabilities in Porous Media Using Neutron Radioscopy ", NEUTRON RADIOGRAPHY (4), J. P. Barton (eds), Gordon and Breach Science Publishers, Yverdon (1993).
- (6) J. T. Lindsay, et al. : " A Summary of Neutron Radiography and Neutron Radioscopy Applications at the University of Michigan Phoenix Memorial Laboratory ", NEUTRON RADIOGRAPHY (4), J. P. Barton (eds), Gordon and Breach Science Publishers, Yverdon (1993).
- (7) Y. J. Chang, C. T. Chen, and A. V. Tobolsky : J. Poly. Sci., 12, 1 (1974).
- (8) H. E. Bair, G. E. Johnson, and R. Merriweather : J. Appl. Phys., 49, No. 10, 4976 (1978).
- (9) E. Sacher and J. R. Susko : J. Appl. Poly. Sci., 23, 2355 (1979).
- (10) E. Sacher and J. R. Susko : J. Appl. Poly. Sci., 24, 1997 (1979).
- (11) E. Sacher and J. R. Susko : J. Appl. Poly. Sci., 26, 679 (1981).
- (12) E. Sacher and J. R. Susko : J. Appl. Poly. Sci., 27, 3893 (1982).
- (13) L. L. Marsh, R. Lasky, D. P. Seraphim, and G. S. Springer : IBM J. Res. Dev. 28, No. 6, 655 (1984).
- (14) T. C. Wong and L. J. Broutman : Polym. Eng. Sci., 25, No. 9, 521 (1985).
- (15) T. C. Wong and L. J. Broutman : Polym. Eng. Sci., 25, No. 9, 529 (1985).
- (16) A. T. Hutton, R. J. Kokfs, J. L. Hoard, and F. A. Long : Chem. Phys., 20, No. 8, 1232 (1952).
- (17) 久保亮五, 長倉三郎, 井口洋夫及び江沢洋 (編集) : " 理化学辞典 ", 第4版, 岩波書店, 東京, 142 (1987).

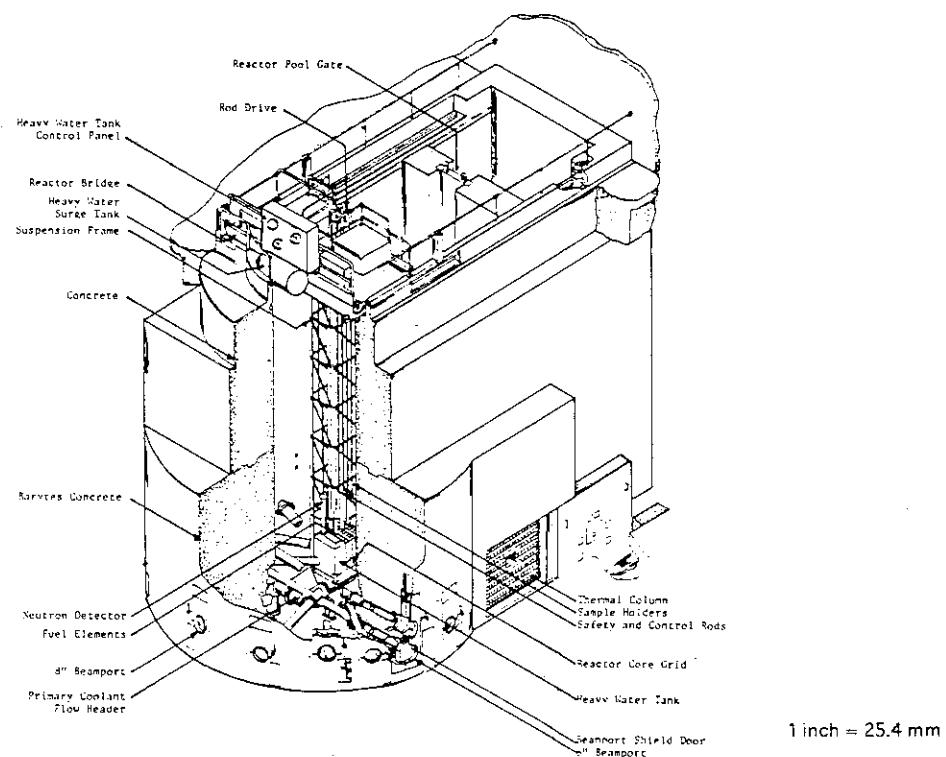


Fig. 1 A cutaway drawing of the U of Michigan's Ford Nuclear Reactor 1)

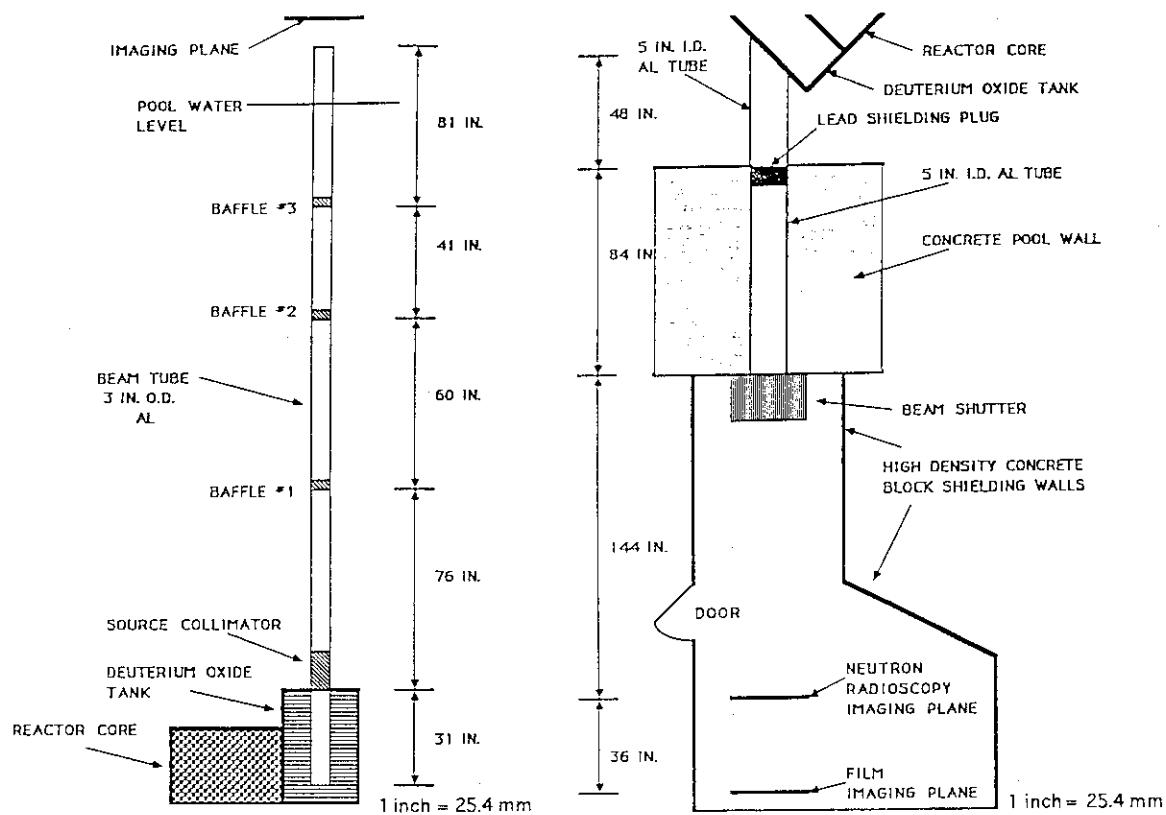


Fig. 2 Cross section of the vertical neutron radiography port ^{注)}

(脚注) Presented at the Topical Meeting on Neutron Radiography in Pembroke, on Aug., 1990.

Fig. 3 Spatial relationships of the horizontal neutron radiography port ^{注)}

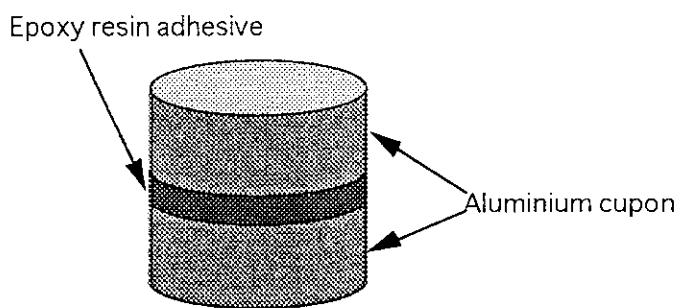


Fig. 4 Outline of Sample

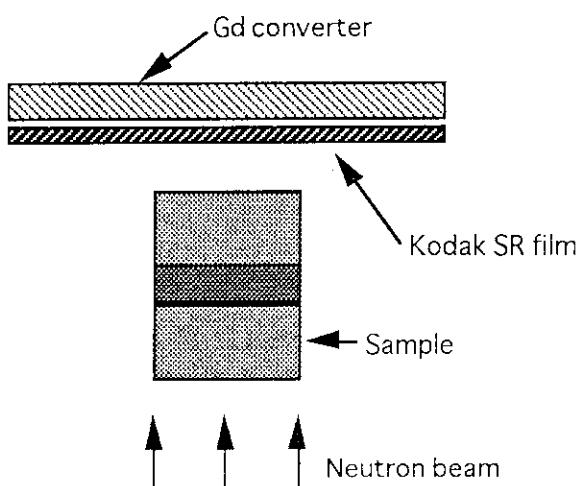


Fig. 5 Configuration for Exposure

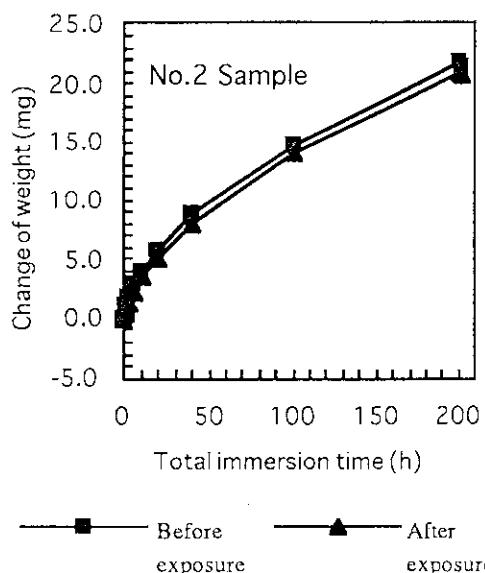


Fig. 6 Change of sample weight vs total immersion time for 'MASTER MEND EPOXY'

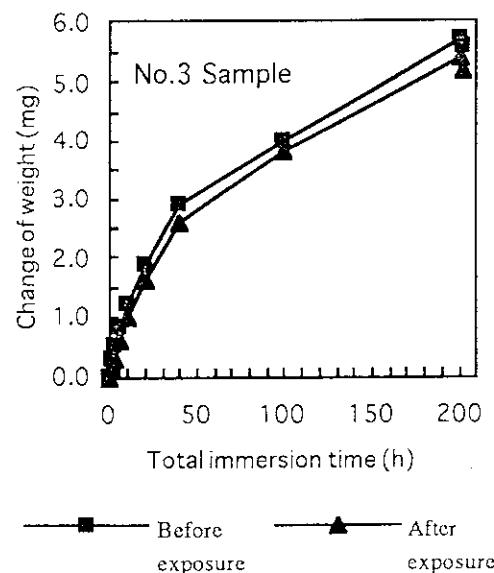


Fig. 7 Change of sample weight vs total immersion time for '5 Minute Epoxy'

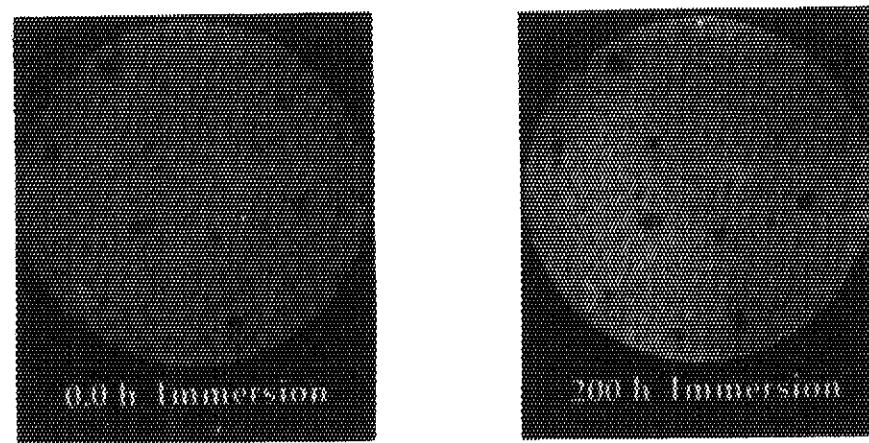


Fig. 8 Neutron Radiographs of No. 2 Sample (MASTER MEND EPOXY)

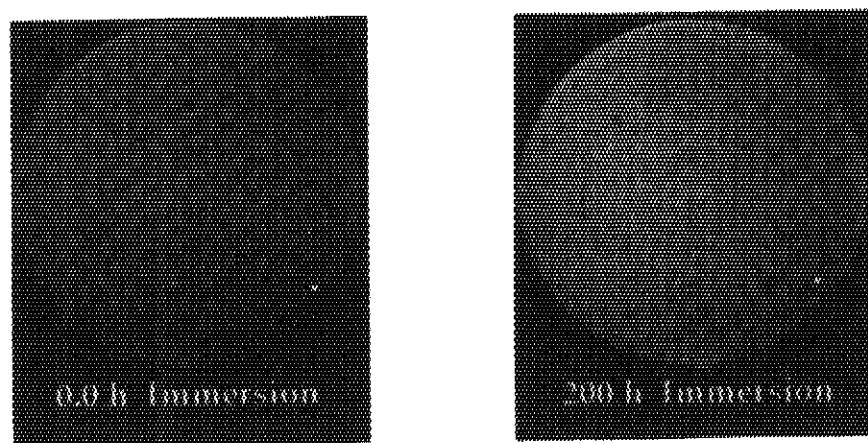


Fig. 9 Neutron Radiographs of No. 3 Sample (5 Minute Epoxy)

3.6 医療照射用同時モニタ検出器の方向依存性

横尾健司・鳥居義也・三村謙

日本原子力研究所 研究炉利用課

1. 概要

研究炉を用いた熱中性子照射による脳腫瘍等の治療研究は、腫瘍部位にほう素（B）を集積させ、熱中性子の ^{10}B (n, α) ^7Li 反応を利用し、生じた α 粒子と ^7Li により腫瘍細胞を死滅させるものであり、ほう素中性子捕捉療法（BNCT）として知られている。原研ではJRR-2熱中性子柱に医療照射設備を設置し、1990年8月に第1回の医療照射を実施した。以来、1994年3月までに22例の照射を行っている。

医療照射における照射時間の決定は、腫瘍部の深さ、ほう素濃度、及び熱中性子束のデータに基づいて行われている。照射中の熱中性子束の変動を監視するために、同時モニタによるリアルタイムの測定を実施している¹⁾。使用している同時モニタ用検出器（Si半導体p-n接合検出器）は、現在までの使用経験から、取り付け位置・取り付け方向に起因すると思われる測定値の変動があり、この原因として検出器の方向依存性が疑われる。このため、今回JRR-3M中性子ラジオグラフィ装置を用いて、検出器の方向依存性を定量化するための実験を行った。

2. Si半導体検出器^{2)~4)}

医療照射の同時モニタとして用いる検出器は、局所的な中性子束を測定しなければならない。そのため、小型であることと、不用な被曝を周囲の組織に与えないために、2次 γ 線生成の少ない物質であることが必要である。このため、半導体検出器を用いた。

しかし、中性子は電荷を持たないので、そのままでは検出することはできない。このため、原沢⁴⁾らが開発した、シリコン半導体に ^6LiF を組み込んだ検出器を使用した。

^6LiF を検出器に添加すると、



反応で放出される ^4He , ^3H パルスを測定することによって、中性子束を求めることができる。

この小型p-n接合Si検出器は光を感じにくく、検出器表面は酸化膜で保護されているので機械的に強く、また放射線損傷に強い。さらに逆バイアスを印加することで有感体積が増加し、 γ 線検出が容易になる、等の特徴を持つ。この検出器の仕様及び構造を次頁に示す。

この検出器はFig. 1に示したように非常に小型である。表面をゴムで覆い、照射前の開頭手術時に脳表面に取り付ける。また、この検出器先端に金線を巻き付けておき、照射終了後に金線の放射化量からの中性子束測定値と比較することによって、校正を行っている。

[小型p-n接合Si検出器]

・構造の概略

p型Siウェハー : 直径 2mm 厚さ 0.3mm 抵抗値 $\sim 1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$
 n型Siウェハー : リン拡散型
 エポキシ樹脂により封入
 Si板表面 : 0.2mmアルミニウム箔
 LiF添加量 : $2.5\mu\text{g}, 0.28\mu\text{g}, 0.028\mu\text{g}$
 (必要な検出感度によって選択)
 検出感度 : $10^5 \sim 10^9 \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$

3. 同時モニタリングの概要^{3), 4)}

γ 線によるパルスと中性子線によるパルスは、その生成要因の違いから容易に波高分別できる。中性子によるパルスは、Fig. 2 に示すように $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反応で生じる荷電粒子 ^4He (2.1MeV)と ^3H (2.7MeV)によるものであり、 γ 線はそのほとんどがそれ以下のエネルギーである。従って、適切に波高分別を行うことにより、 γ 線と中性子による照射量を同時に測定することができる。ここでピークは ^3H ピークのみに着目することとし、シングルチャンネルアナライザ(SCA)部から得られるカウンター・タイマーの計数より中性子束を算出している。

4. 実験方法

Fig. 3 に示すように、検出器をターンテーブル上のアクリル板にセットし、テーブルを回転させて検出器の角度を変化させながら計数の測定を実施した。測定についてはビームに対して水平方向、垂直方向の2通りの設置方法をとり、各々について測定を実施した。

5. 装置構成

測定装置の構成図を Fig. 4 に示す。検出器を出たパルスは、信号線(同軸ケーブル1.6mmφ)によってプリアンプに導かれ増幅される。その後スペクトロスコピーアンプによってさらに増幅されたのち、マルチチャンネルアナライザにより解析される。その一方で増幅されたパルスは、シングルチャンネルアナライザによって波高分別されたのち、レートメータによって計数值が指示され、この値はペンレコーダに連続記録される。

計数の測定は、N88-BASICで記述された測定プログラムにより、1分間隔で40秒間の自動測定が行われ、データが蓄積される。

6. 測定結果

照射角度による検出器の感度をレーダーグラフにしたものと、水平設置のものについては Fig. 5 に、垂直設置のものについては Fig. 6 に、それぞれ示す。

これらのレーダーグラフは、平均値を1.0としたときの相対値として表したものである。グラフからもわかるように、#18検出器においては、水平方向・垂直方向ともに方向依存性が見

受けられる。水平設置の場合には、90度方向において計数値の減少が見られ、垂直設置の場合には、75度方向及び300度方向において計数値の減少が見られる。とくに、垂直設置では計数の変動が20%近くもあった。

7. 考察

#18検出器のように、設置方向によって最大で20%近い計数率の変動があると、医療照射において中性子モニタとして使用するには精度が悪い。今回の垂直設置における測定では、#18検出器1本しか行わなかったが、全検出器について今回と同様の特性測定を行い、方向依存性の少ない検出器を選択するのが良いと考えられる。

8. まとめ

今回の実験では、水平設置について方向依存性を確認したところ、0~180°と0~-180°の回転では、計数値の変化が対称とはならないという結果を得た。さらに、検出器を中性子ビームに対して垂直に設置した場合においても、角度によって20%近い計数率の変動が認められた。現在使用している検出器についても今回と同様の特性測定を実施し、方向依存性について把握する必要があると思われる。今後は、さらに方向依存性の少ない新たな検出器の開発を進めていきたい。

また、後から実施した中性子ラジオグラフィによる検出器の撮影では、樹脂層だけでなくそれ以外の内部構造についても明瞭に写ることが確認された。検出器の中性子ラジオグラフィ写真を、X線によるものと併せて Fig. 7~9 に示す。今後の実験では、検出器の内部構造の撮影についても、中性子ラジオグラフィをさらに活用していきたいと考えている。

《参考文献》

- 1) YOKOO K. et al., Measurement of Thermal Neutron Flux for BNCT in JRR-2, JAERI-M 94-058(1994) 32-35.
- 2) 畠中 坦他 中性子捕捉療法手術中の急性脳腫脹のモニタリングとその対策
外科診療, 23(1981) 1399-1403.
- 3) HAYAKAWA Y. et al., Simultaneous Monitoring System of Thermal Neutron Flux for Boron-Neutron Capture Therapy, Rad. Res., 75(1978) 243-251.
- 4) HARASAWA S. et al., Improved Monitoring System of Neutron Flux during Boron-Neutron Capture Therapy, Rad. Res., 88(1981) 187-193.

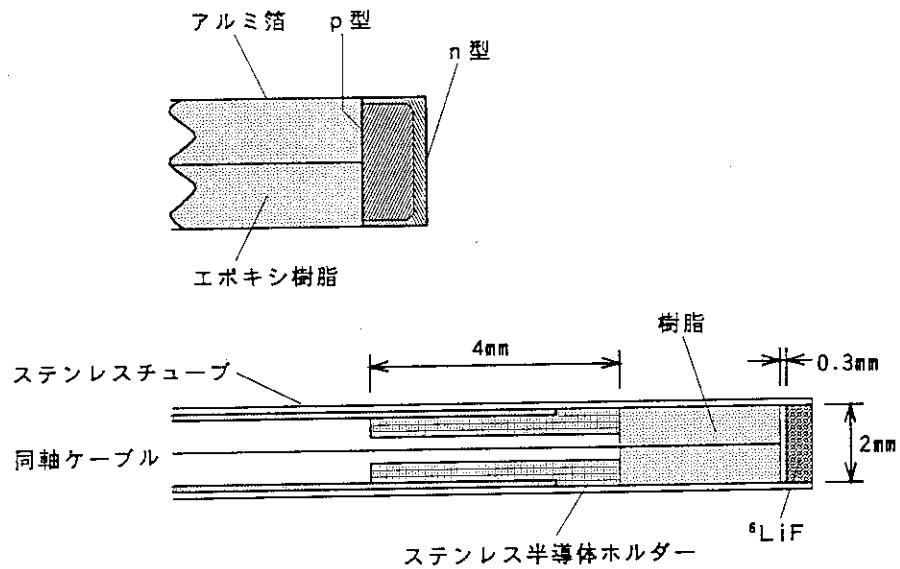


Fig.1 p-n type Si Semiconductor Detector

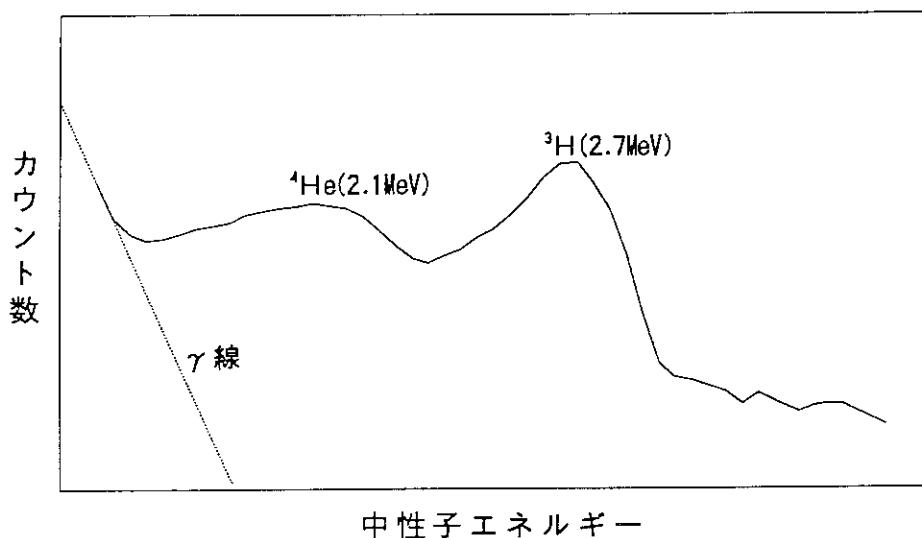


Fig.2 Pulse-Height Distribution

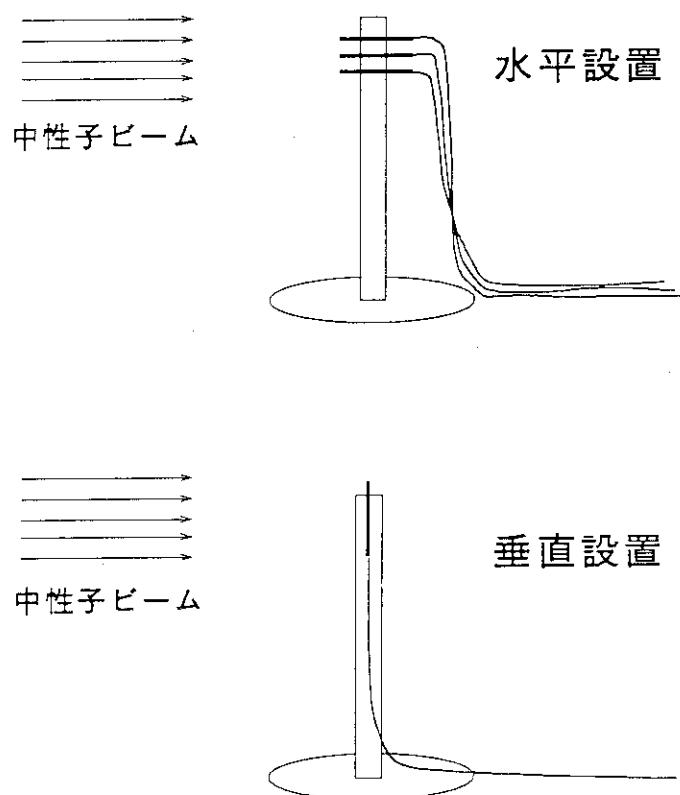


Fig. 3 Experimental Arrangement of Detectors

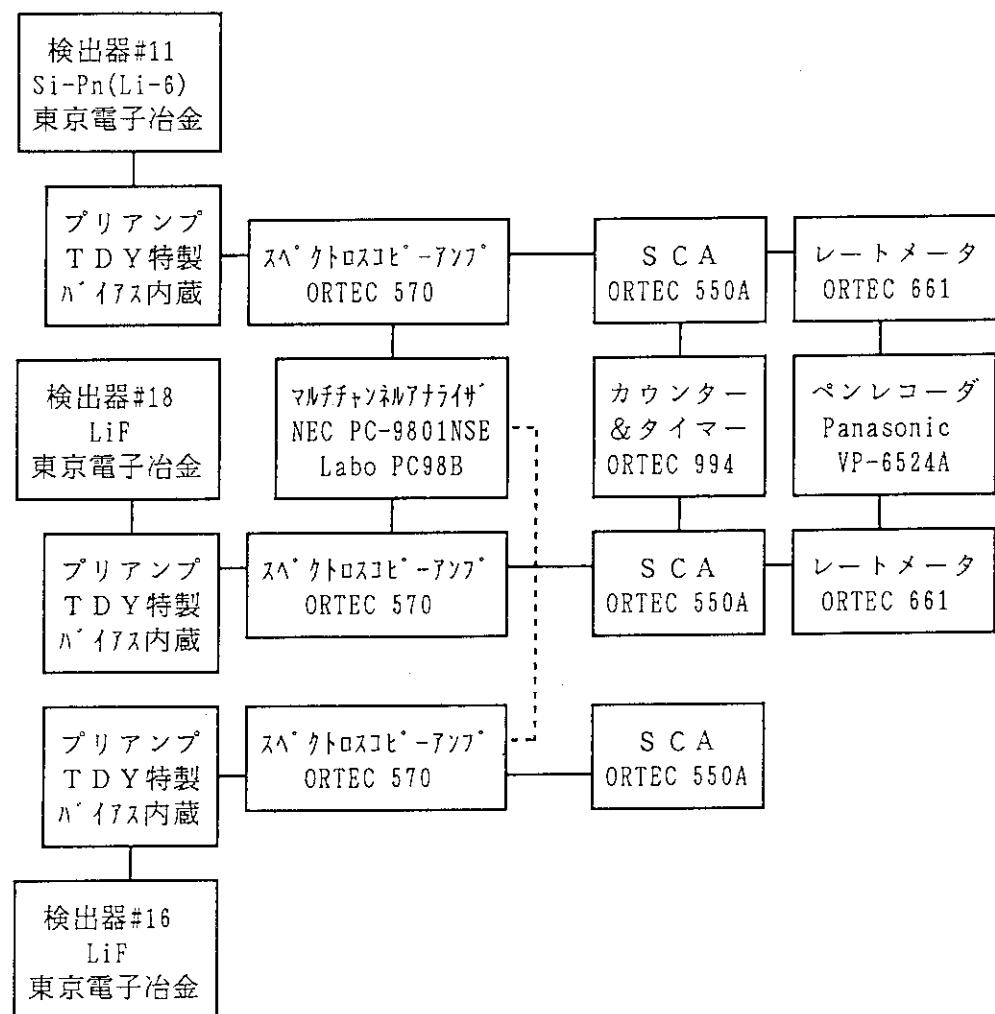


Fig. 4 Real-time Monitoring System Configuration

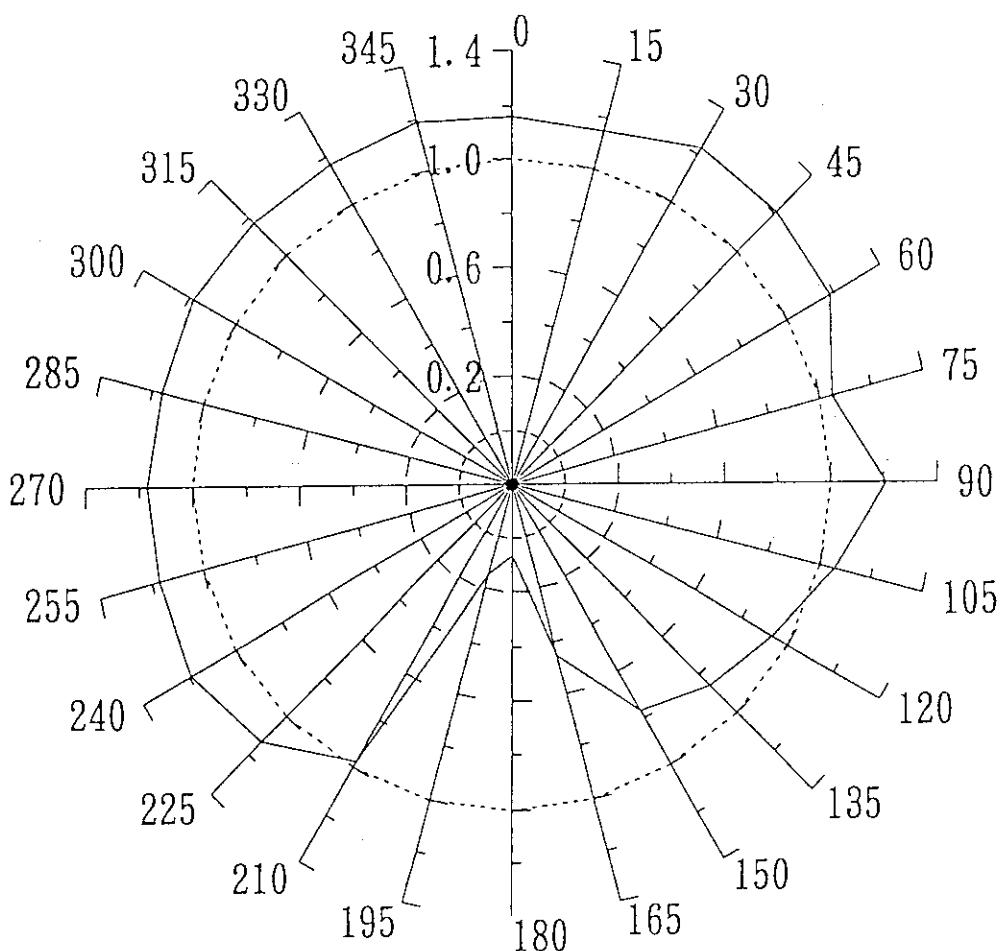


Fig. 5 Angular Sensitivity Distribution of Detector No. 18 (Horizontal)

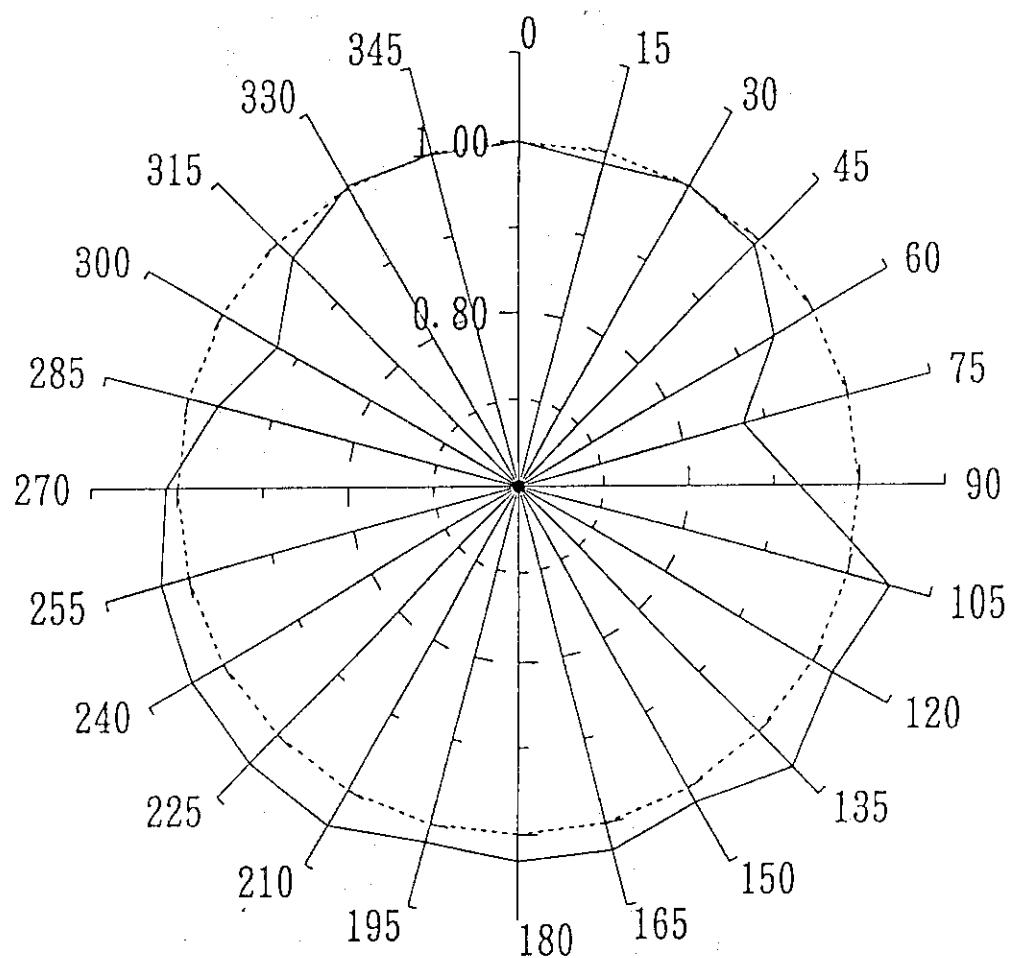


Fig. 6 Angular Sensitivity Distribution of Detector No. 18 (Vertical)

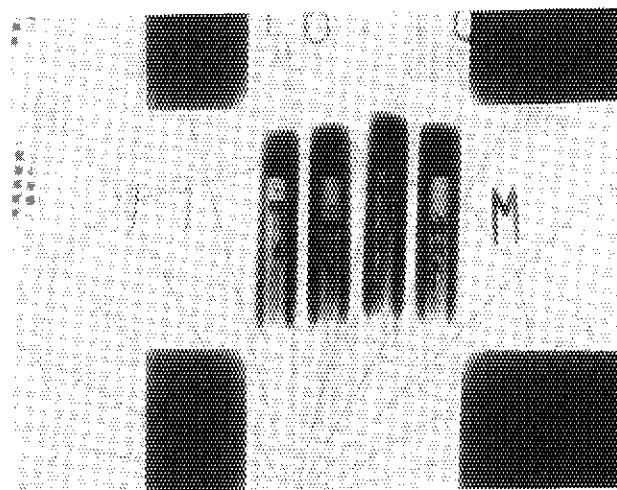


Fig. 7 Images of Detectors using X-ray (X)

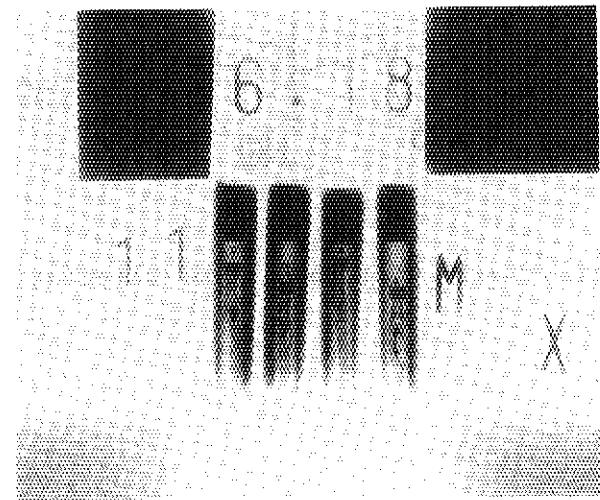


Fig. 8 Images of Detectors using X-ray (Y)

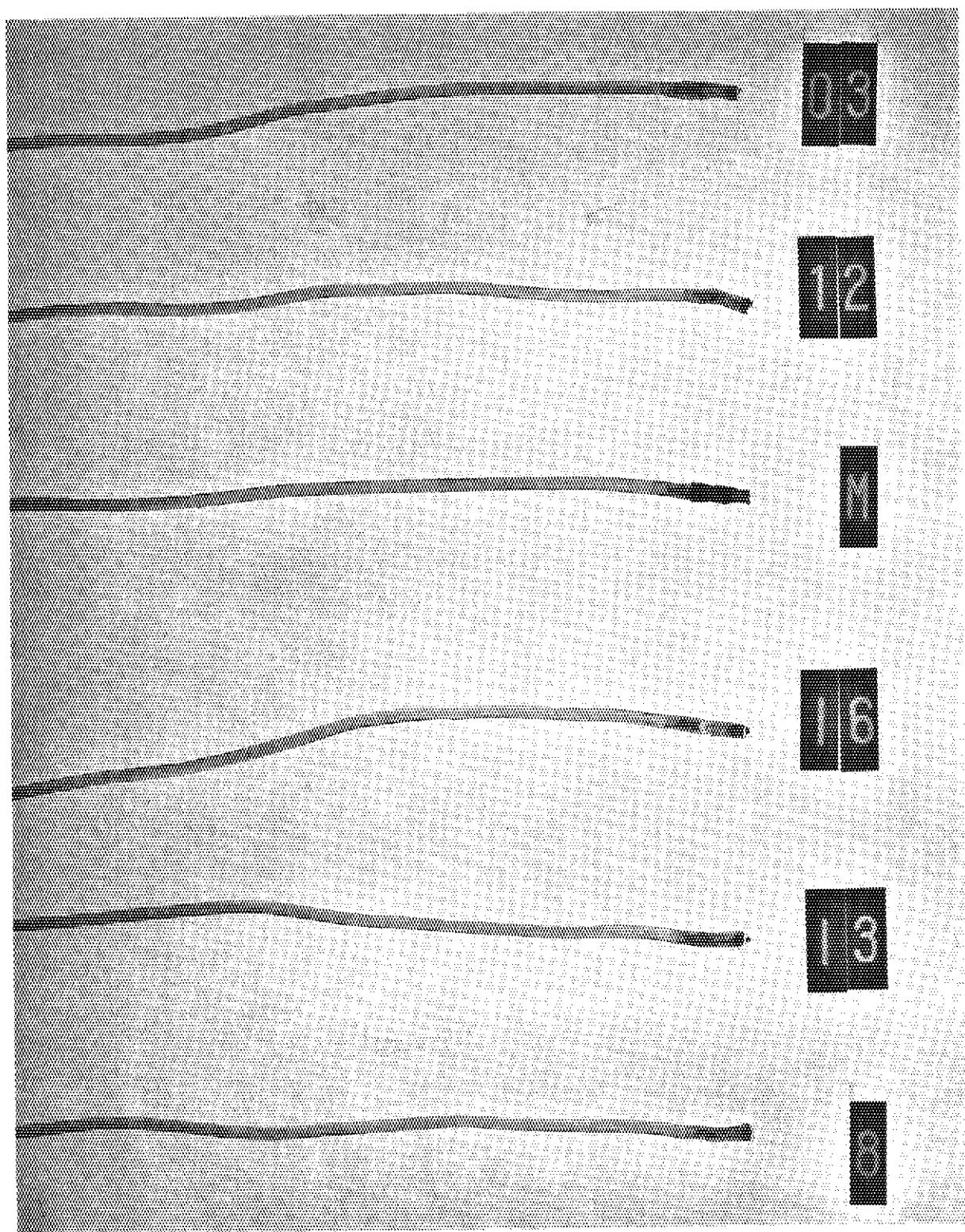


Fig. 9 Images of Detectors using Neutron Radiography

4. 研究発表 2

中性子ラジオグラフィの応用

- 4.1 中性子ラジオグラフィによる二相流中の液膜測定
大久保 努（原研・伝熱流動研究室）
- 4.2 中性子ラジオグラフィによる加圧流動層内気泡成長の可視化
加藤 泰生（山口大学）
- 4.3 熱流動現象の可視化と計測
竹中 信幸（神戸大学）
- 4.4 中性子ラジオグラフィによる宇宙用排熱システムの伝熱管内の可視化
中澤 武（神戸商船大学）
- 4.5 高速度ビデオを用いた高速流体現象の可視化
日引 俊（京大原子炉実験所）
- 4.6 マウスおよびラットの In vivo 中性子ラジオグラフィ撮像
加藤 一夫（稻沢市民病院）
- 4.7 放射性廃棄物貯蔵用多孔物質研究への中性子ラジオグラフィの応用
F.ペテルカ（チェコ）
- 4.8 中性子ラジオグラフィの植物研究への応用
中西 友子（東京大学）
- 4.9 農林水産研究における中性子ラジオグラフィの利用
宮本 進（農林水産省畜産試験場）

4.1 中性子ラジオグラフィによる二相流中の液膜測定 －原研における伝熱流動現象への NRG の応用－

大久保 努

日本原子力研究所 伝熱流動研究室

1. はじめに

ここ数年来、主として大学を中心として、中性子ラジオグラフィ（NRG）を伝熱流動現象に応用した研究が積極的に進められており、着実に成果があげられている^[1]。NRGの伝熱流動現象への応用の主たる目的は、可視化することの難しい金属配管等の内部における現象を外乱を与えることなく可視化することであるが、そのほかにも画像の輝度の情報から定量的な物理情報を得ることができる。前者の例としては、流れの様子（流動様式や状態）の観察が、また、後者の例としては、気液二相流のボイド率の測定などがあげられるが、他の手段では容易に得られないような情報がNRGによって比較的容易に得られる場合があり、伝熱流動現象の有用な計測手段の一つとなってきた。

原研においては、平成3年度からJRR-3MのNRG（TNRF2）を伝熱流動現象に応用する研究が開始され、平成4年度に除熱の限界状態時における配管内の流動現象のリアルタイムの可視化が行われた^{[2], [3]}。この経験を活かして、平成5年度には、新たに、気液二相流中の液膜の測定に対する実験を実施した。以下にこの実験の概要を紹介する。

2. 実験の概要

2.1 実験の内容

本実験では2種類の実験を実施した。一方は、蒸気-水の気液二相流中での液膜厚さの測定で、他方は、空気-水の対向二相流中の落下液膜の測定である。以下に各々の内容について述べる。

(1) 蒸気-水実験

本実験では、燃料集合体内の流路を模擬したテスト部配管内に存在するスペーサによる管壁上の薄膜の厚さの変化を測定し、スペーサによる液膜の薄膜化等に関する体系的なデータを取得することを目的として実施している。

この実験の背景をFig. 1^[4]に示す。BWR型原子炉および冷却材流量が低下した状況でのPWR型原子炉では、炉心内は蒸気と水の混在した二相流状態になっている。この時、水は厚

さ数十～数百ミクロンの膜状になって高速で燃料棒表面を流れ、蒸気は流路の中央部分を流れている。この状況を簡単に示したのが、Fig. 1 (a)である。しかし、原子炉の燃料集合体内には、燃料棒同士が接触したりしないようにその位置を保持しておくため、スペーサと呼ばれる構造物が流路内に存在しており、このスペーサの存在によって流れが乱されて、Fig. 1 (b)に示すように燃料棒表面の液膜の厚さを薄くすることが知られている。

このような状況に基づいて、原子炉の燃料集合体内のスペーサの液膜に及ぼす影響を図示したものがFig. 1 (c)であり、スペーサ直上流における燃料棒表面の液膜の薄膜化が著しくなって液膜の消失が起こると、燃料棒の冷却が著しく劣化し、原子炉を正常に運転できない状況になってしまふ。従って、除熱上十分余裕を持って原子炉を運転する上で、このような液膜の消失が起こる状態を正確に予測できる必要があり、とりわけこのスペーサの効果を正確に把握することが重要である。

しかしながら、蒸気一水二相流中でこのような液膜厚さの分布を測定することは容易なことではなく、N R Gを用いて比較的容易にこの測定が可能となれば、非常に有用なデータとなりその意義は大きい。そこで、このような液膜の測定の可能性を検討するため、本実験を開始した。Fig. 2 に本実験の状況を簡単に示す。

(2) 空気-水実験

本実験では、矩形流路内で下方から上昇する空気流に抗して上方から落下する水の落下の状況を観測して、落下水の膜厚等のデータを取得することを目的として実施している。

これは、元々 J R R - 3 M の事故時の流動状況を模擬した状況であり、冷却材の循環が著しく低下した状態において、炉心の上方に存在する水が炉心で発生する蒸気の上昇流に抗してどれくらい炉心に落下できるかを検討した実験^[5]と同じものである。本実験は、このような対向二相流状態での落水の状況をモデル化する上で必要な液膜の厚さあるいは平均ボイド率のデータを容易に取得することを目的で実施されている。従来のモデルをより一般化する上でこれらのデータを利用し、新しいモデルの構築を進めて行く予定である^[6]。

2.2 実験装置

(1) 蒸気-水実験

Fig. 3 に本実験で使用する流動ループのフローシートを示す。テスト部のみ N R G 第 2 撮影室に設置し、蒸気および水の循環を外部に設置したループで行っている。Table 1 に本ループで達成できる流動条件範囲を示す。装置自体は、これまで N R G 実験に使用してきた物に改造を加えたものである。ループは、基本的にステンレス製であるが、テスト部の照射範囲のみアルミニウム製である。テスト部内に設置したスペーサを模擬した構造物を種々のタイプの物に交換しながら、一連の体系的なデータを取得する計画である。

(2) 空気-水実験

Fig. 4 に本実験で使用する装置を示す。本実験では、テスト部および落水量の測定部を N R G 第 2 撮影室内に設置し、室外のポンプで水を循環させている。テスト部は、アルミニウム製である。空気は、炉室内の圧空供給ラインから導いて使用している。Table 2 に本実験の条件範囲を示す。本実験では、矩形テスト部のギャップ幅およびテスト部の長さを変えて、落水状況と落水流量の測定を行う。

2.3 実験結果

(1) 蒸気-水実験

実験で得られた画像の一例を Photo 1 に示す。蒸気のみの状態では、テスト部内面に何も見えないが、液膜流が存在している場合には、その状態が明確に確認できかつスペーサの直上流で液膜の厚さが薄くなっているのが分る。

(2) 空気-水実験

実験で得られた画像の一例を Photo 2 に示す。落水の状況が極めて明瞭に実時間で観察できる。落水は、主として矩形の短辺側で生じているが、長辺側での落水も見られ、これについては画像解析によって情報が得られると考えている。Fig. 5 に実験で得られた落水量と空気流量の関係の一例を示す。この結果は、文献 5 に示されている結果と同等である。

3. これまでの成果と今後の予定

(1) 蒸気-水実験

これまでの実験により、目的とした情報が取得できる見通しを得ることができた。今後、適切な画像処理法を確立するとともに、スペーサ部分を交換して体系的なデータの蓄積を行いたい。

(2) 空気-水実験

これまでの実験で、落下液膜の状況および液膜厚さの情報を得ることが可能な映像データを取得できた。今後、適切な画像処理法を確立するとともに、形状の異なるテスト部を用いて体系的なデータの蓄積を行い、それらを解析モデルの作成および検証に用いて行きたい。

尚、これまでの T N R F 2 の使用経験から、以下のようない点に関して装置利用上の制限が存在し、それが実験を実施する上での制限となっており、実験を考える上ではこれらに留意する必要があるとともに今後の改良が望まれる。

- 1) 使用可能な電源容量
- 2) 撮影室内の利用可能スペース（下部）
- 3) 撮影室へのアクセス配管
- 4) 炉室内排水ラインの圧損

上記1)および2)に関しては、既に改善の対応がなされつつある。

4.まとめ

これまでの実験結果から、気液二相流中の液膜の測定にN R Gが有効な手段となることが明らかになるとともに、必要とする情報を含んだ画像データを得ることができた。今後さらに積極的にN R Gの活用を図りたい。

参考文献

1. 例えば、三島嘉一郎、竹中信幸：“中性子ラジオグラフィによる混相流の可視化”，
混相流、5巻 2号、102 (1991).
2. 岩村公道 他：“中性子ラジオグラフィによる沸騰二相流およびC H F現象の観察”，
日本原子力学会1992年秋の大会、M 9 (1992).
3. 岩村公道：“中性子ラジオグラフィによるD N B現象の観察”，JAERI-Conf 94- 002
4. Yokobori, S., et al. : "A Penomenological Study on the Dryout Mechanism in a
Fuel Rod", NURETH-4, 1054 (1989).
5. Sudo, Y., et al. : "Experimental Study of Falling Film Water Limitation under
a Counter-Current Flow in a Vertical Rectangular Channel", JSME Int. O J.,
Series II, 34[2], 169 (1991).
6. 数土幸夫：“垂直円管内の対向二相流落下水制限機構に関する研究”，機構論No. 934-4,
75 (1993).

Table 1 Major conditions for steam-water experiments

最高系圧力 :	10 kg/cm ² G
最高流体温度 :	184 °C
最大蒸気流量 :	0.02 kg/s
最大水流量 :	0.06 kg/s
蒸気クオリティ :	15 ~ 65 %
テスト部内径 :	10 mm
スペーサ形状 :	円管状 (各種寸法)
スペーサ高さ :	20, 30, 50 mm
スペーサ肉厚 :	1 mm
スペーサギャップ :	1 mm

Table 2 Major conditions for air-water experiments

系圧力 :	大気圧
流体温度 :	常温
最大空気流量 :	300 ℥/min
最大供給水流量 :	15 ℥/min
上部プレナム水位 :	550 mm
テスト部流路長さ :	782, 50 mm
テスト部流路幅 :	66 mm
テスト部流路ギャップ :	2.3, 8.3 mm

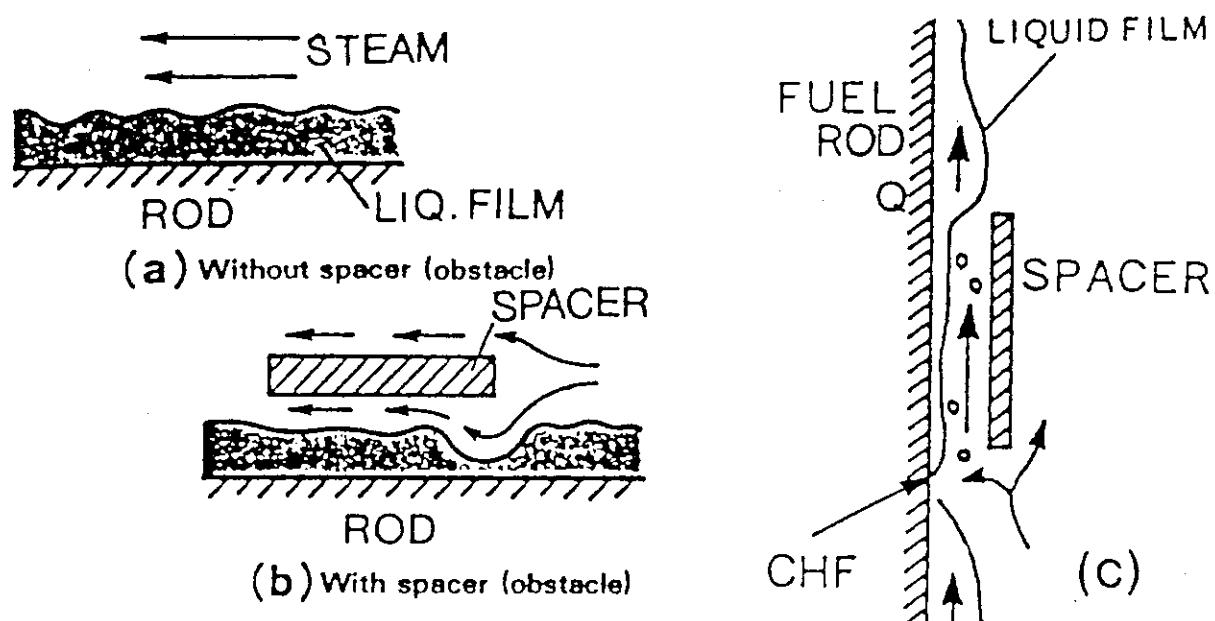


Fig. 1 Schematic of effect of spacer on liquid film flow on fuel rod surface^[1]

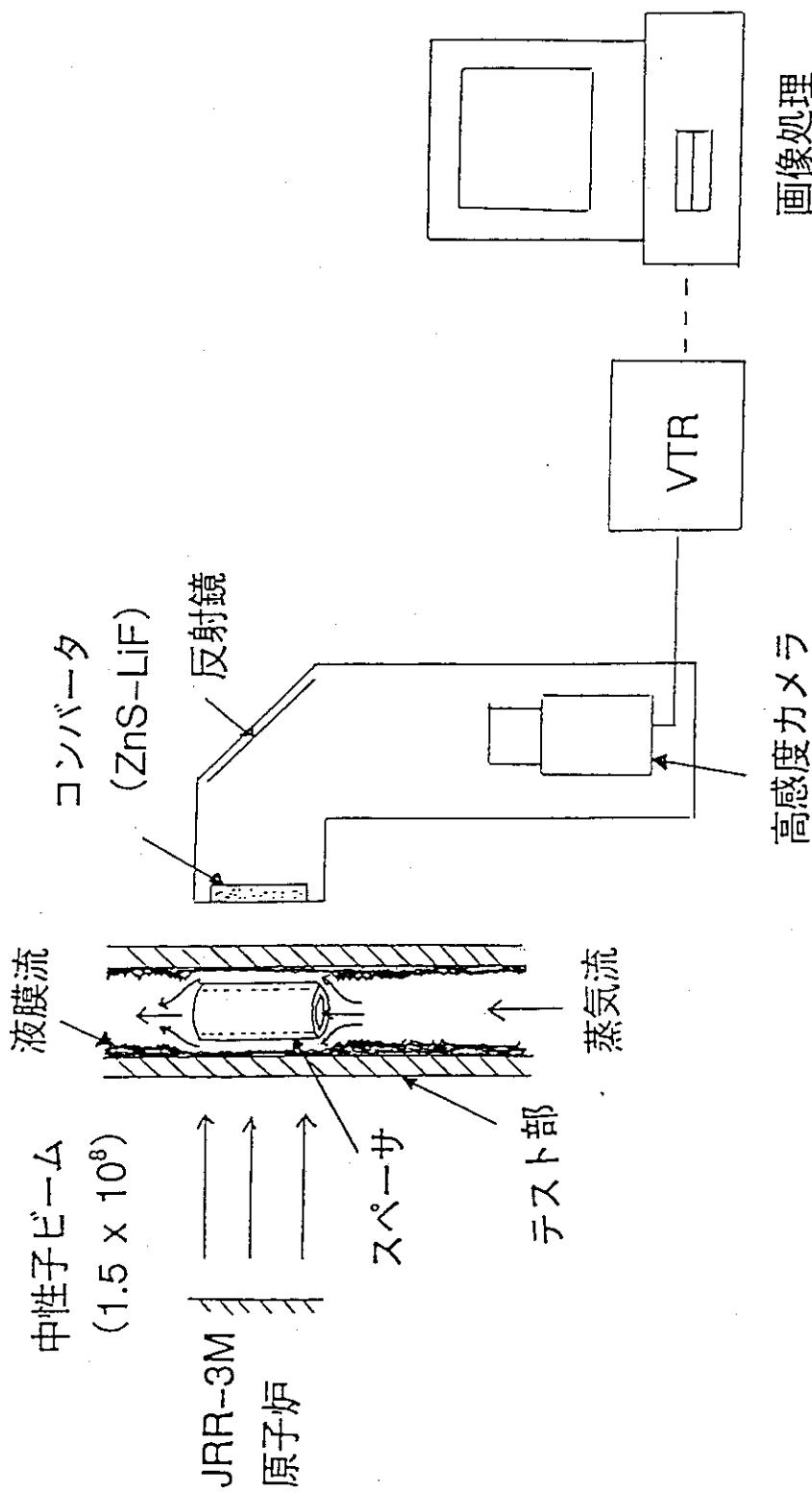


Fig. 2 Schematic of NRG steam-water experiments

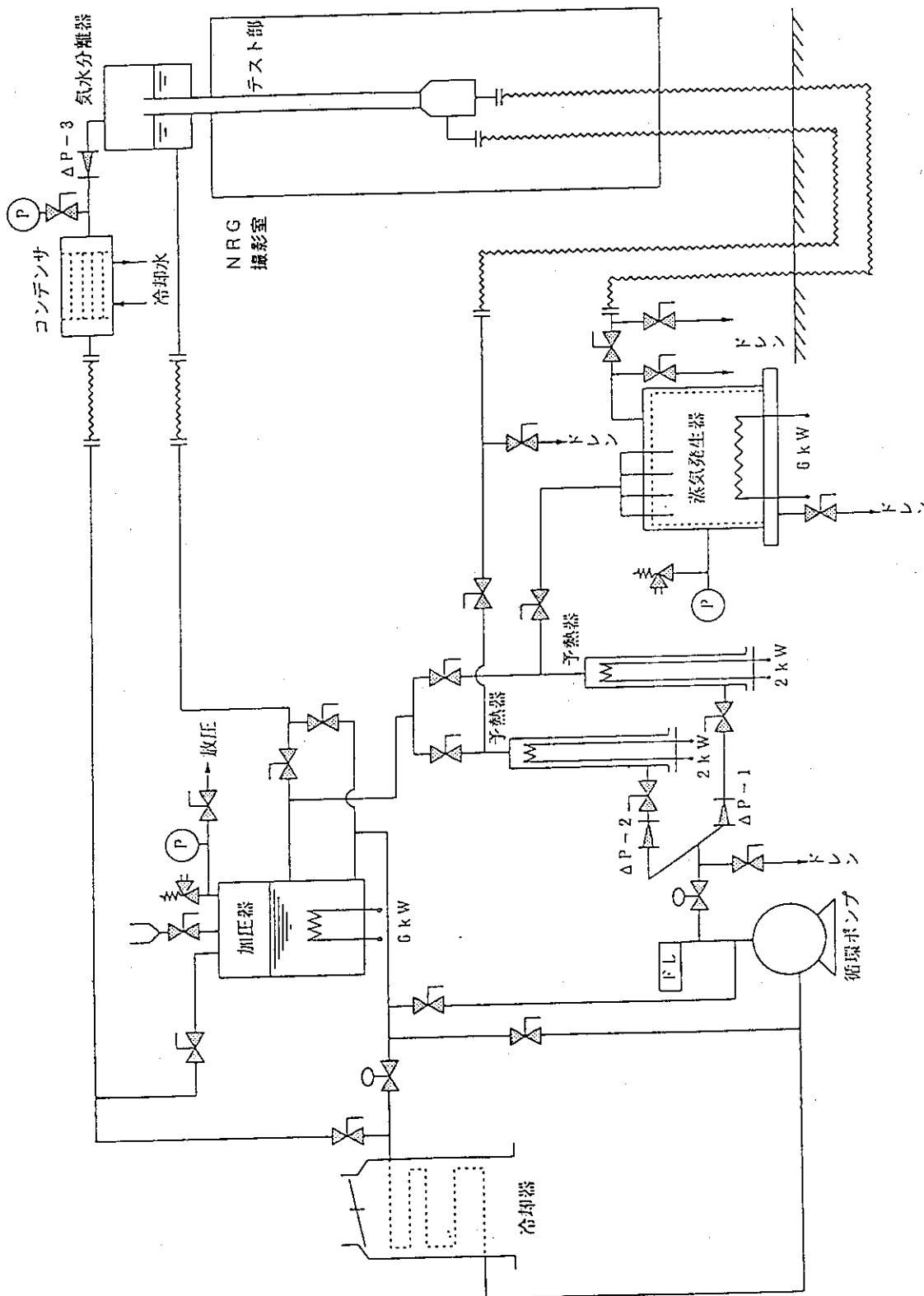


Fig. 3 Schematic diagram of NRG steam-water experiment loop

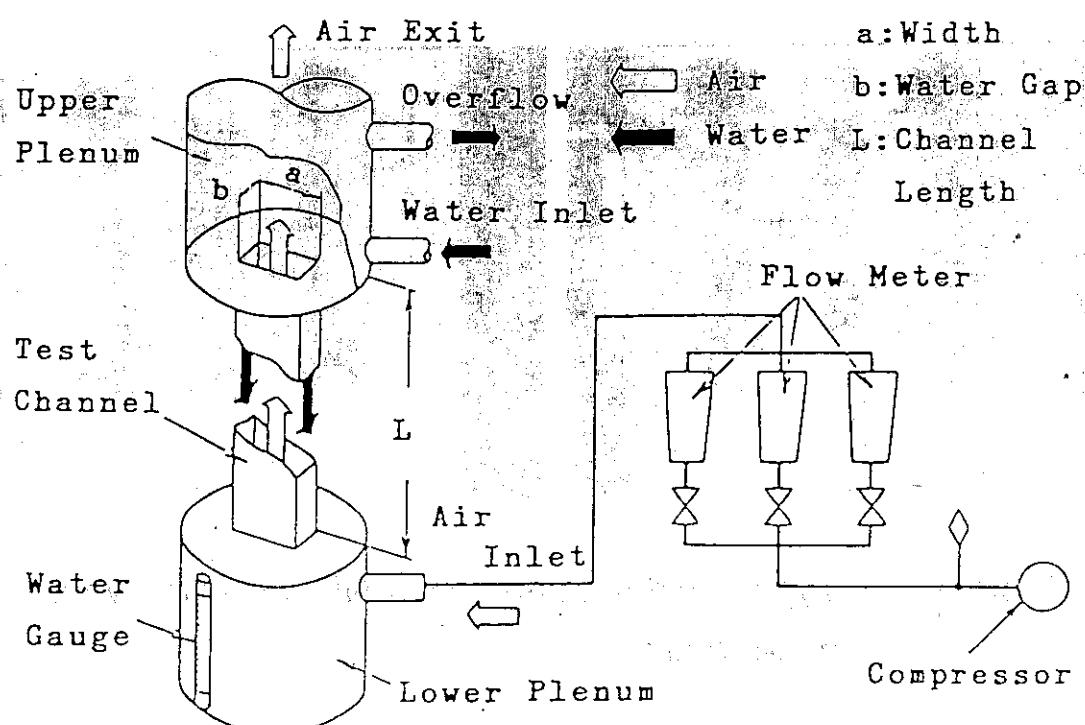


Fig. 4 Schematic of NRG air-water experiments

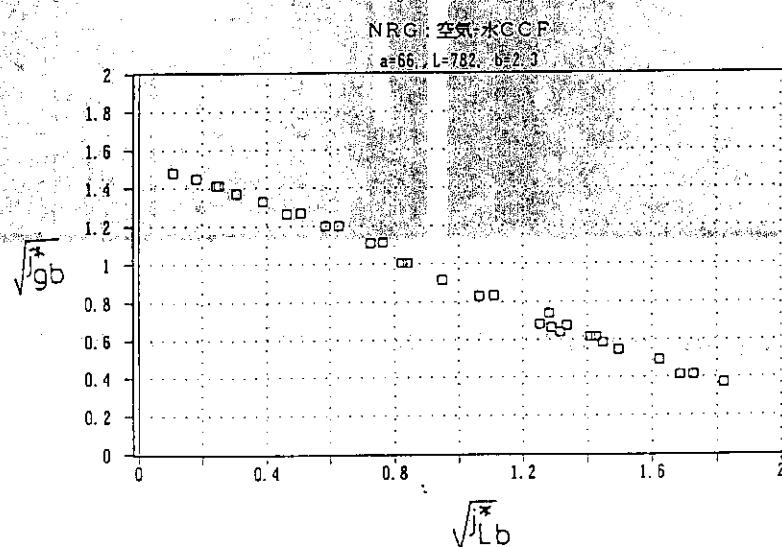


Fig. 5 Typical results from NRG air-water experiments

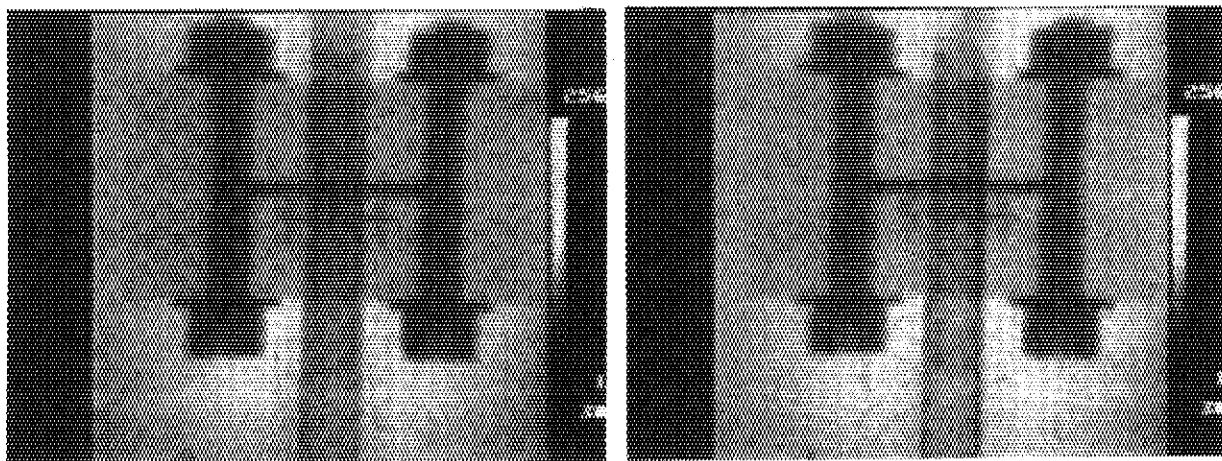


Photo 1 Typical video image from NRG steam-water experiments

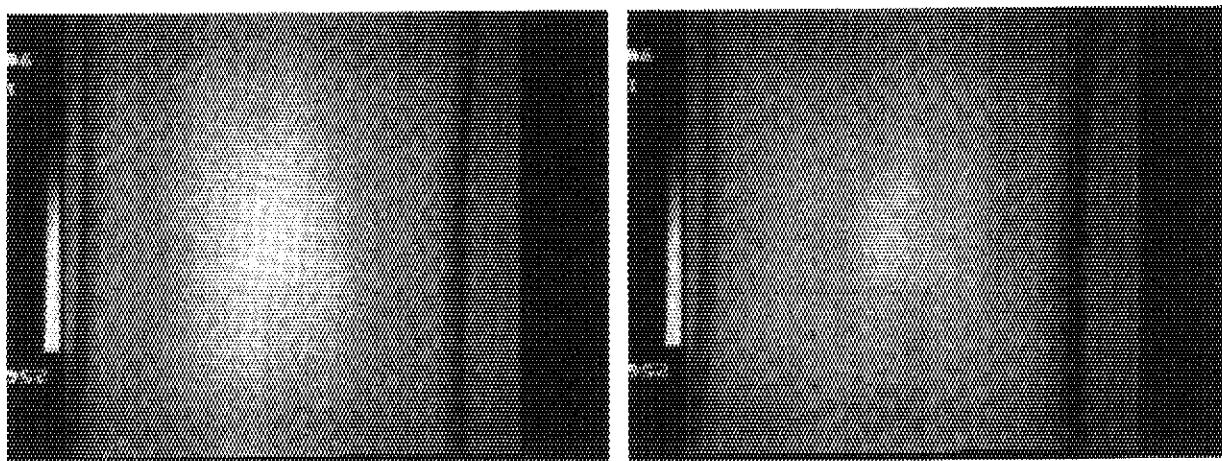


Photo 2 Typical video image from NRG air-water experiments

4.2 中性子ラジオグラフィによる加圧流動層内気泡成長の可視化

加藤泰生

山口大学工学部

1. 緒言

流体吹き込みによる生成気泡の挙動が固気系流動層装置の性能を左右してしまうため、気泡生成・成長・崩壊に関する情報は極めて重要である。加圧流動層では、圧力の増加とともにその径が小さくなつて、上昇速度が低下することや、その気泡頻度が大きくなることなどが I. H. Chanら⁽¹⁾、Barretoら⁽²⁾、Kawabataら⁽³⁾により報告されている。しかしながら、流動層装置内では、ガス吹き出し層底部で気泡の発生と形成が行われるが、一般に気泡と粒子の相互干渉の発生に関して重要なガス吹き出し層底部における気泡の挙動についての詳細な報告がない。また、その層底部における気泡の発生に対する圧力増加の影響についての報告も不足している。さらに可視化画像を用い、気泡径、気泡上層速度、気泡発生頻度、気泡形状など定量的に評価したものも少ない。そこで、本研究では、生成気泡特性の理解のためその第1歩として加圧状態における気泡流動を可視化観察するとともに気泡の一連の挙動を画像解析し、その特性を見いだすことを試みた。加圧状態において、1つは三次元流動層内單一ノズルから生成した気泡の挙動を中性子ラジオグラフィを用いて可視化観察を行った。さらに二次元流動層では同様に高速ビデオを用いた可視化観察から一連の気泡の挙動をP-system (PIAS-LA555WS 画像処理装置) により画像処理して、生成気泡に関する諸特性を定量的に調べたので併せてそれを報告する。

2. 実験装置及び方法

流動層本体は二次元と三次元の2つのタイプを用意した。

流動層実験装置の概略をFig. 1 (基本構成は二次元と三次元とも同じ) に示す。圧縮機①で加圧された気体はフィルタ②、減圧弁③A、耐圧用の面積式流量計(10kgf/cm², 3000N cc/min) ⑤、整流弁⑥を通過した後に、耐圧容器⑨の下部に設置した單一ノズル (二次元の場合、真鍮製: 内径φ2mm、外径φ4mm、三次元の場合、アルミ製: 同左) から、流動層内へ吹き込まれる。その後、気体はフィルタ⑩、リリーフ弁⑪を通過し、排気される。吹き込む気体流量は減圧弁③Bと整流バルブ⑥によりまた容器内の圧力は減圧弁③Bにより制御される。温度はC-C熱電対で、また容器内の圧力はデジタルマノメータでそれぞれ測定される。

さらに二次元タイプは可視化を考え、前後を透過性の良い厚さ5mmのフロートガラスで作成し、矩形断面 4×100mm²、高さ180mmのものである。また使用粒子はガラスピーブーズで

径 $d_p = 100 \mu\text{m}$ 、また静止層高 L_c は 100mm を用意した。さらに、耐圧容器は層底部の吹き込み真鍮製ノズル上端から離脱した気泡の生成及び成長を観察するために、容器前後部のぞき窓（直径 $\phi 80\text{mm}$ ）に厚さ 13mm の 10kgf/cm^2 用耐圧強化ガラスが設置されている。画像は容器後部からストロボ光で照らされた逆光による影像を容器前部のぞき窓から高速ビデオカメラ(500fps)で撮影することで得られる。

三次元タイプは、前後を中性子の透過性の良い厚さ 5mm のアルミ製の板で作成し、矩形断面 $20 \times 100\text{mm}^2$ 、高さ 180mm のものである。本実験において、使用粒子はポリスチレンビーズで径 $d_p = 400 \mu\text{m}$ 、また静止層高 L_c は 140mm を用意した。さらに、耐圧容器は層底部のアルミ製ノズル上端から離脱した気泡の生成及び成長を観察するため、容器前後部のぞき窓（ $\phi 80\text{mm}$ ）に 10mm 厚のアルミ板が設置されている。撮影装置およびその配置に関しては省略する。

二次元可視化画像の処理は次のように行った。まず、P-systemの画像処理ソフトを用いて、撮影した画像から、一個一個の生成気泡を観察し、測定する生成気泡をカーソルで選ぶ。その後、設定した輝度数のしきい値により、選択した気泡とその周囲の画像の輝度数を判別し、生成気泡の等価円直径 D_b が求められる。ここで D_b は 20 個の生成気泡の画像から得られた平均値である。更に、気泡の発生周期 f は、画像処理で使用した画像から一秒ごとの気泡発生個数をカウントし、それをもとに得られた。二次元流動層では気泡の形状が円筒形と仮定する⁽⁴⁾。但し、気泡の径が流動層の奥行きより小さい場合は仮定は成り立たない。気泡径の観測では、流動層の前後壁に接触した気泡の面積を求め、その面積から気泡の等価円直径が求められる。

本報告では中性子ラジオグラフィを用いて得られた三次元画像の処理は行っていないが、ほぼ上述前半の処理経過で行うことになる。

3. 実験結果と考察

三次元流動層の可視化写真をFig. 2aに示す。圧力状態 0.2 、 0.4 、 0.8MPa の吹き込み気流の状態が捕らえられている。今回は流量調整が巧く行かなく、気流量の多い噴流状態すなわち噴流層（Spouted Bed）状態となり、気泡の発生初期が得られなかった。噴流ジェットの先端に気泡があるはずだが、画面上には現れてない。工夫次第では、噴流層（Spouted Bed）状態までも含めた気泡、気流の流動挙動に関する画像処理が可能である。

次に二次元流動層の場合の可視化写真を、Fig. 2bに示す。圧力状態 0.1 、 0.2 、 0.3MPa における気泡が捕らえられている。これらの図から吹き込み空気量、圧力の大きさによる影響で気泡の形状、径、頻度の違いが現れていることが明らかに分かる。

Figure 3 に、画像処理により求めた生成気泡の等価円直径と気泡の体積の関係を示す。図中の実線は前項仮定で求めた理論値である。画像処理結果より求めた気泡径と理論値とはよく一致することがわかる。しかし、気泡の流量が小さいとき画像から求めた気泡の径

が理論値と比べてやや高い値をとっている。

Figure 4に、圧力及び流入空気の流量変化に対する気泡径の関係を示す。図より、各圧力状態において、同じ生成気泡径を発生させるためには圧力Pの増加とともに、それに必要な流入空気流量Qinを増加させる必要があることがわかる。また図より生成気泡が大きくなる傾向は各圧力状態において、皆同様な右上がりでほぼ同じ勾配をもつ傾向がみられる。すなわち、吹き込む空気流量Qinが増加すると、どの圧力においても生成気泡径Dbが大きくなることがわかる。次に、画像の可視化観測により得られた気泡の発生周期fと流入空気流量Qinの関係をFig. 5に示す。この図より、各圧力状態において、空気流量が増加すると気泡の発生頻度は減少することがわかる。また、その減少する傾向は各圧力状態において、皆同様な傾向を有する。

4. 結論

二次元流動層実験から

- (a) 圧力の増加による気泡径の減少が顕著にみられる。実験で得られた生成気泡の等価円直径から算出される生成気泡の体積は二次元流動層内気泡形状の仮定による理論推算値とほぼ一致する。
- (b) 各圧力状態において、気泡流量が大きくなるとその気泡発生頻度の増加も顕著に見られる。
- (c) 高速ビデオによる可視化で、層底部のノズル近傍の気泡の挙動に関する理解がより深まった。

三次元流動層実験から

- (d) 噴流層状態のジェットに関する可視化画像が得られた。
- (e) 中性子ラジオグラフィによる可視化画像から気流、気泡挙動の定量的検討の可能性が示唆された。

【使用記号】 Db: 気泡の等価円直径[cm]、dt: 二次元流動層の奥行き厚さ[cm]、dp: 平均粒子径[cm]、f: 気泡発生周期[1/sec]、Lc: 静止層高さ[cm]、P: 圧力[dyne]、Qb: 気泡流量[cm³/s]、Qin: 空気吹き込む流量[cm³/s]、t: 時間[sec]、tb: 気泡形成に要する時間[sec]、V: 気泡体積[cm³]

【参考文献】

- (1) I. H. Chan, C. Sishtla and T. M. Knowlton, Pow. Tech., 53(1987), pp217-235
- (2) G. F. Barreto, J. G. Yates and P. N. Rowe, Chem. Eng. Sci., 48(1984), pp1935-1950
- (3) J. Kawabata, M. Yumihama, Y. Tazaki and S. Nonma, J. Chem. Eng., 14(1981), pp85-89
- (4) T. Chiba, K. Terashima and H. Kobayashi, Chem. Eng. Sci. Japan(1972), Vol. 2, pp965

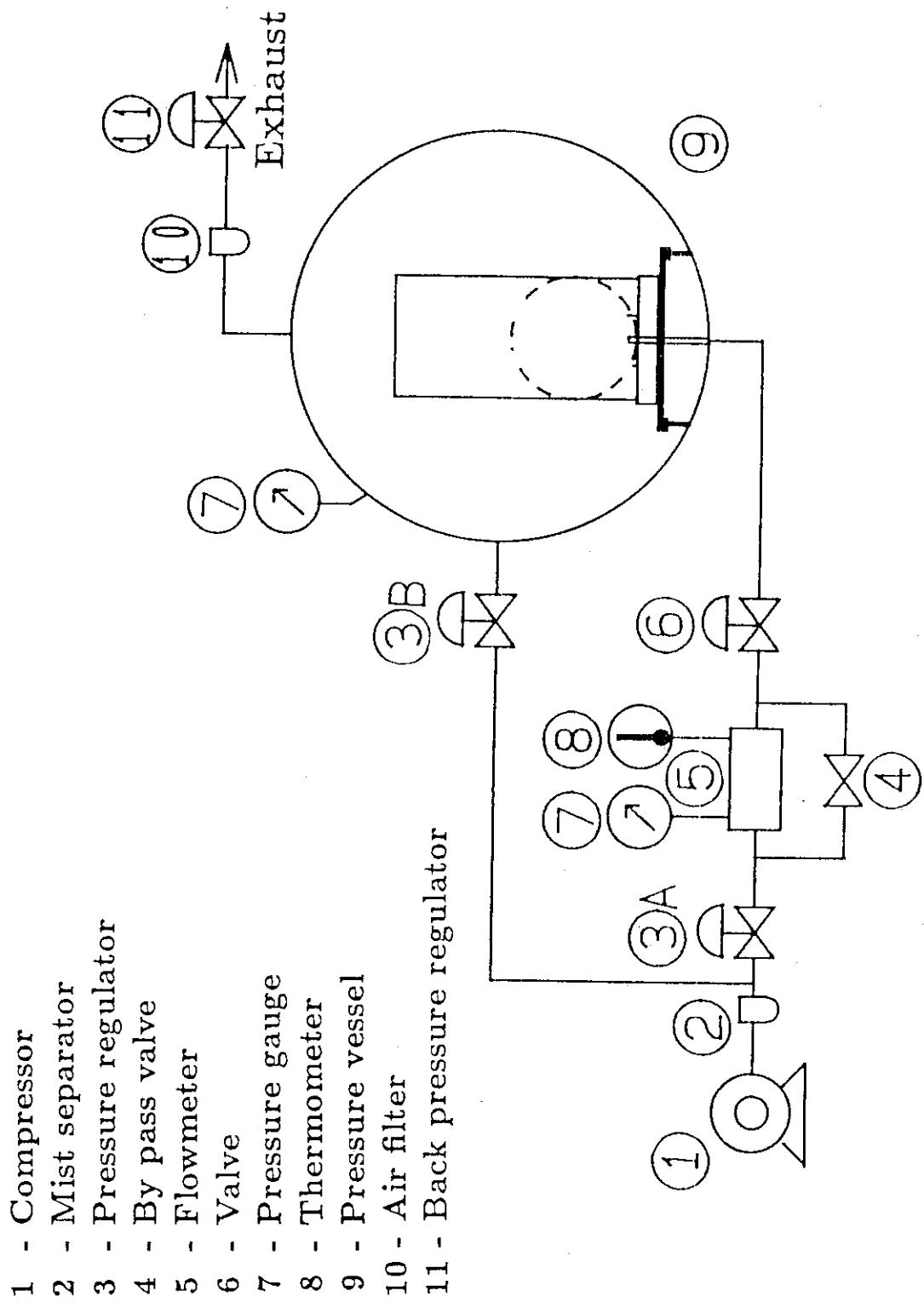


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

(a) \langle a \rangle
(b) \langle b \rangle

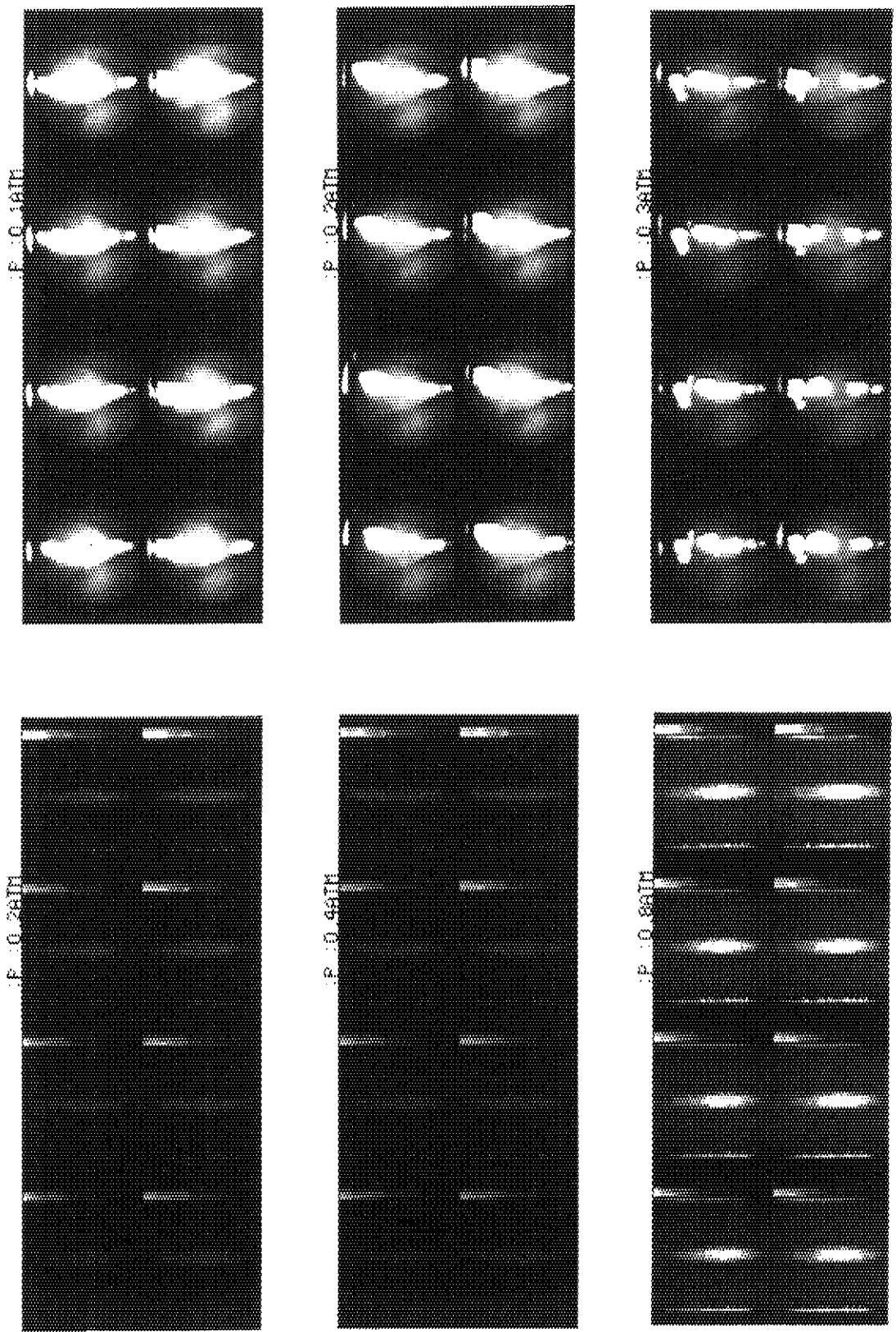


Fig. 2 A few examples on the visualized bubble image
(a) Neutron radio-graphy method(3-D image)
(time interval $\Delta t=10\text{msec}$)
(b) Shadow-graphy method(2-D image)

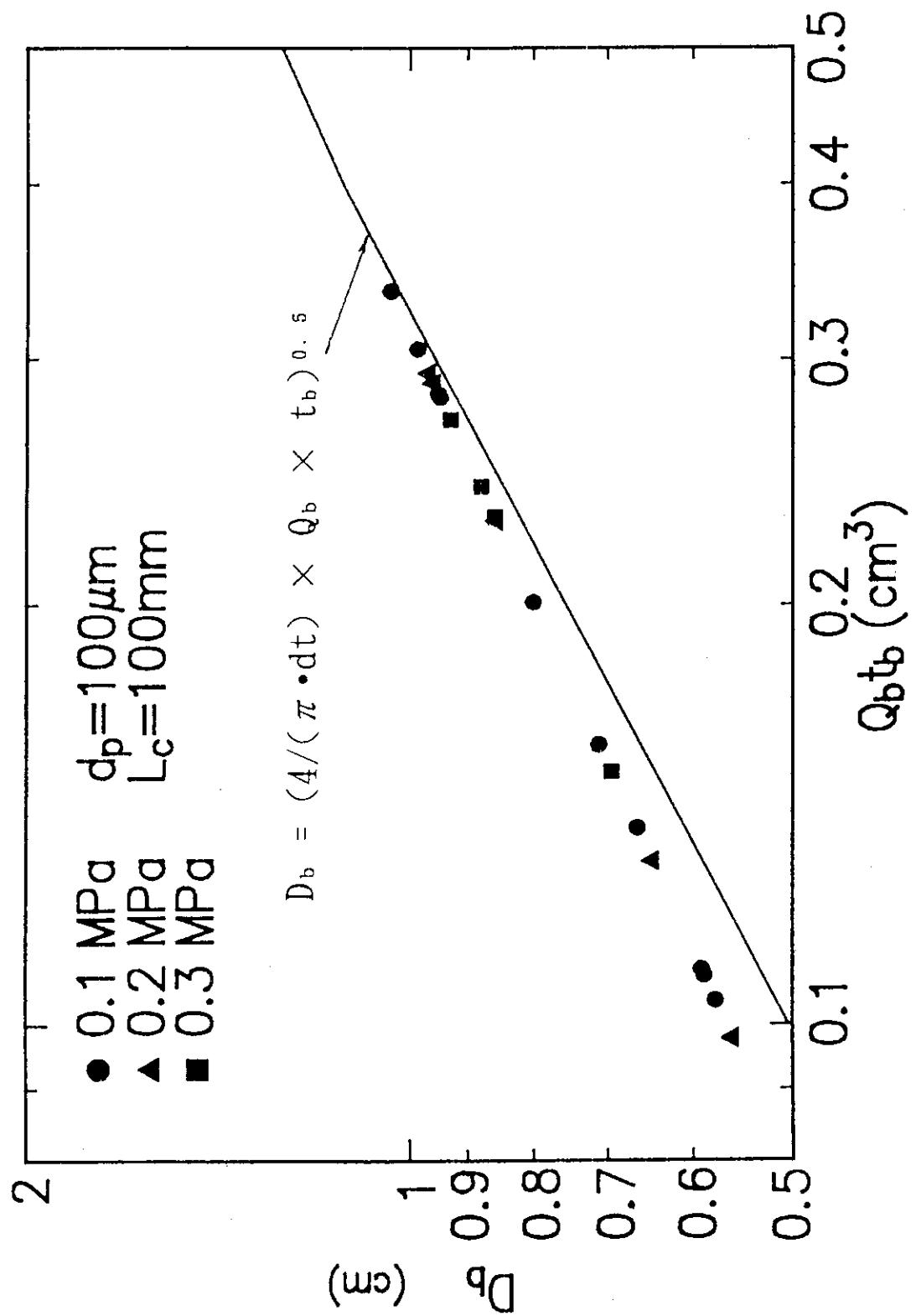


Fig. 3 Relationship between the bubble diameter D_b and the bubble volume Q_b

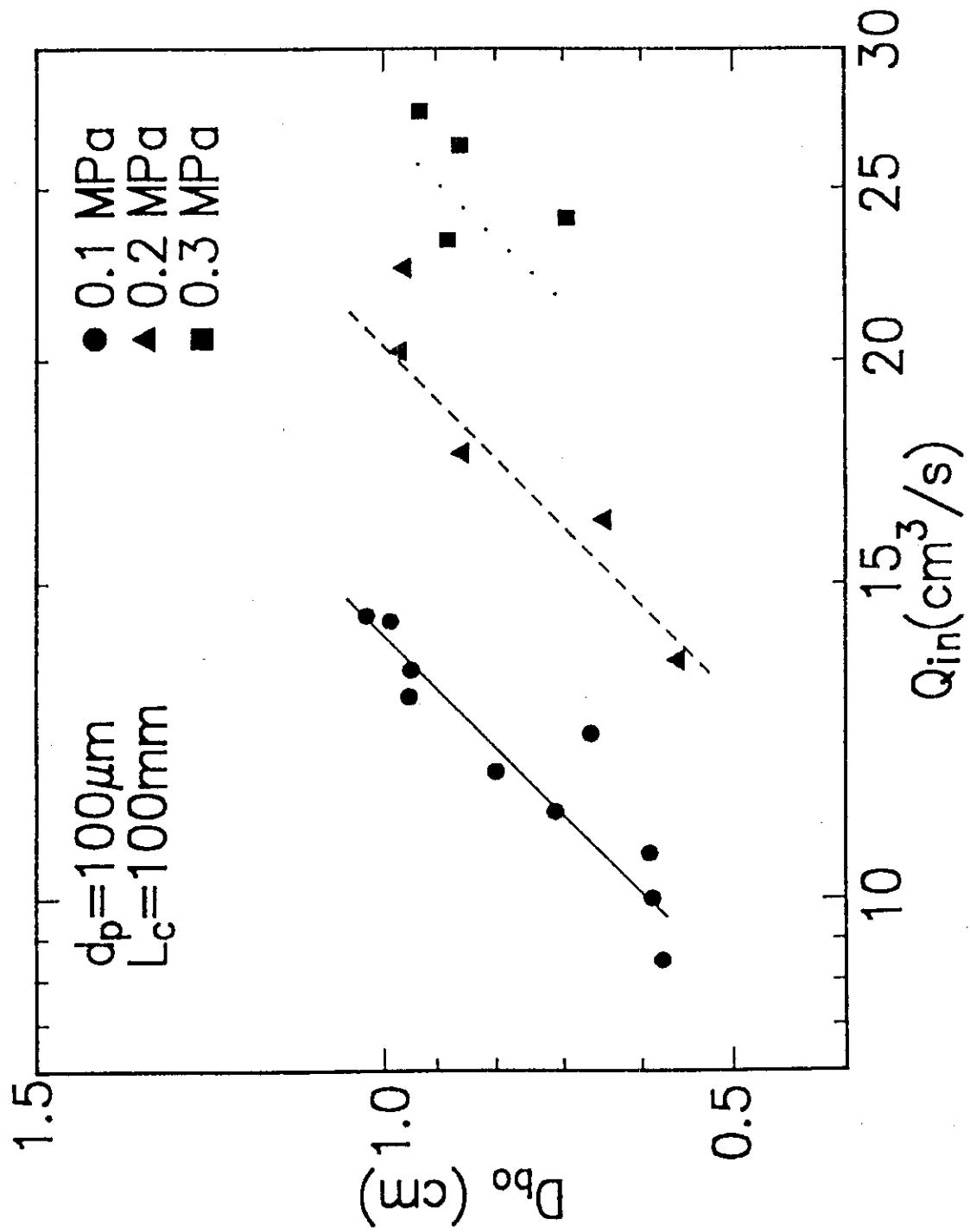


Fig. 4 Relationship between the bubble diameter D_b and the inlet flow rate Q_{in}

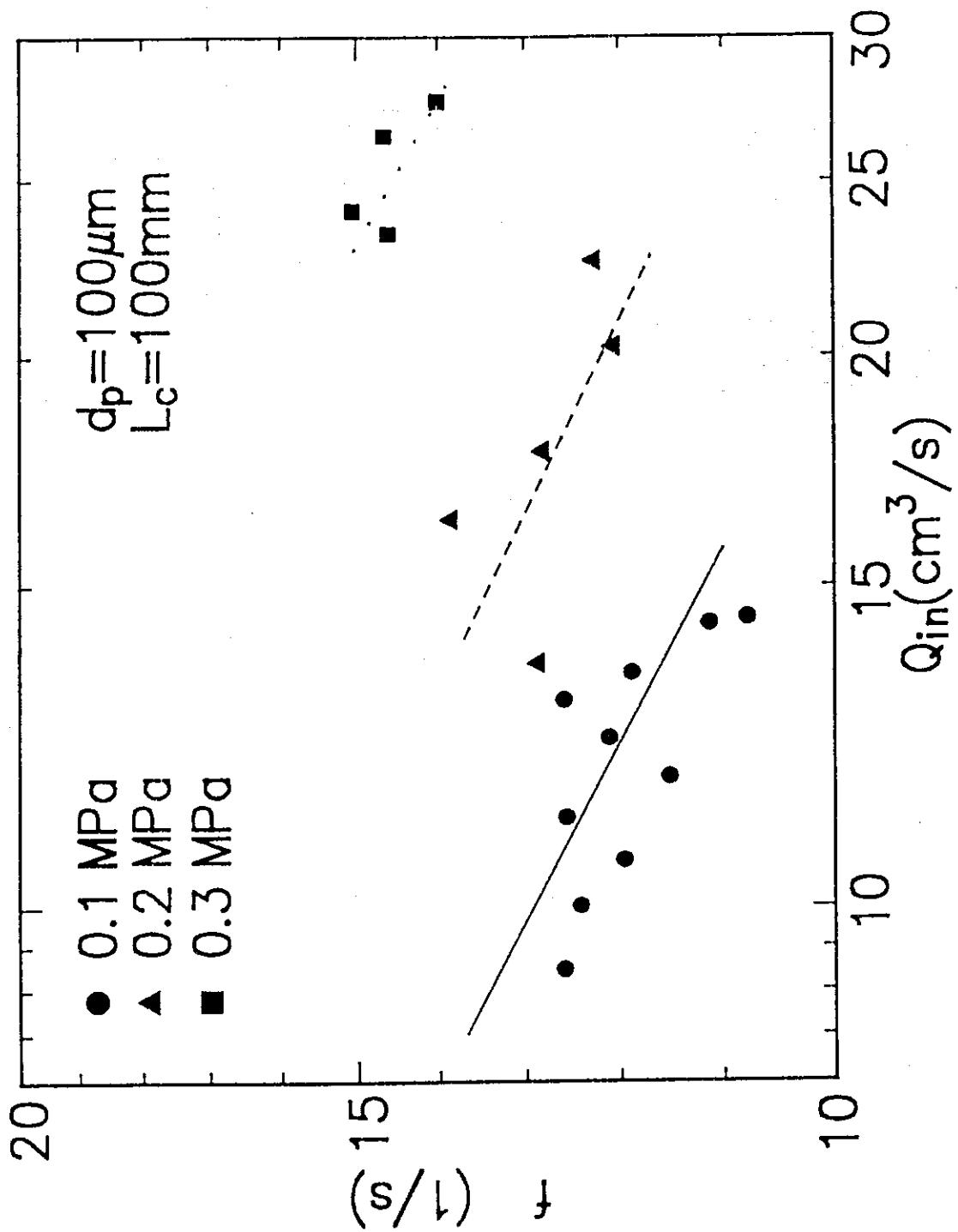
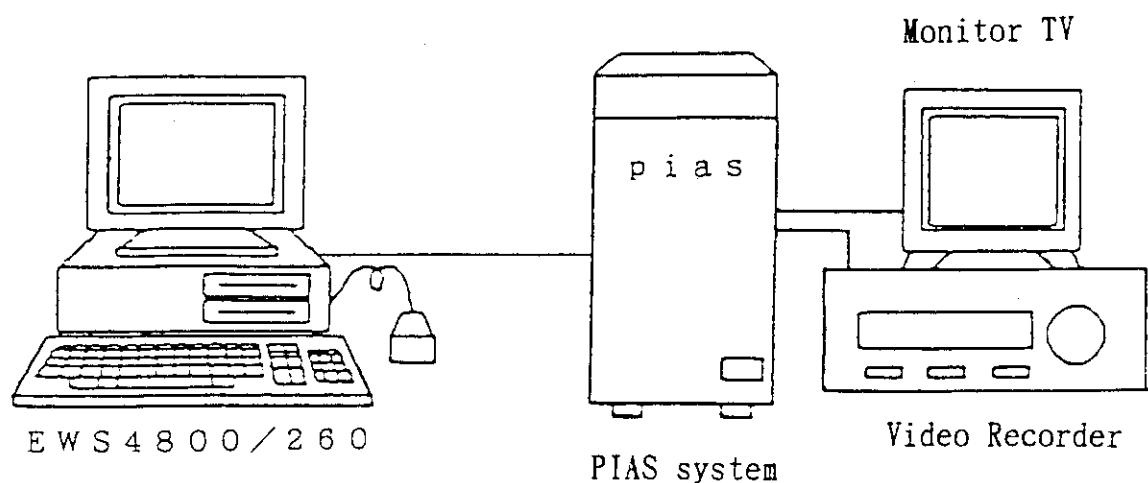


Fig. 5 Relationship between the bubble frequency f and the inlet flow rate Q_{in}



Schematic diagram of image processing system
(PIAS 555WS SYSTEM)

4.3 熱流動現象の可視化と計測

竹中 信幸
神戸大学 工学部

本研究は実時間中性子ラジオグラフィの優れた特性を生かし、機械工学、原子力工学、化学工学等で重要な熱流動現象を対象として、従来の方法では困難であった可視化と計測を行うことにより、熱流動現象の解明と中性子ラジオグラフィの有用性を示すことを目的としており、以下のテーマについて実験を行っている。

- 1、液体金属流れの可視化と計測
- 2、混相流の可視化と計測
- 3、混相流機器の可視化と診断

本年度の成果として、気液二相流の定量的なボイド率分布の可視化についての画像処理法を考案したので、その方法、結果について以下に示す。

1、緒言

非定常一次元の二相流については二流体モデルに基づいた解析コードが開発されており、実験結果との比較により構成式の検討が行われ、原子炉の安全性やボイラの設計に利用されている。しかし多次元の二相流の解析については現在においてもモデルの整備が始まられた段階にある。⁽¹⁾ モデルの整備を行い、適切な構成式を決定するためには非定常多次元の実験結果が必要であり、特に多次元のボイド率分布のデータが必要である。可視光に透明な容器を用いれば多次元二相流の可視化は容易ではあるが、透過光、反射光のいずれで観察しても気液界面での散乱光を測定してしまうためボイド率の測定を可視化によって行うことは一般には困難である。このことはレーザー光を用いる測定においても同様であり、気液二相流の実験的研究の障害となっている。

ラジオグラフィは放射線による透視画像法であり、気液界面での散乱の問題はなく透過量でボイド率の測定が行え、定常現象であればCTによる断層測定も可能であり、X線、γ線、中性子線を用いた研究が報告されている。⁽²⁾⁻⁽⁵⁾

本報では、実時間中性子ラジオグラフィによる透過画像に画像処理を行い、容器内の非定常二次元気液二相流の定量的な二次元ボイド率分布を可視化しこのような計測結果が多次元の二相流解析法を開発する上で有用なベンチマーク試験となることを示す。

2、ボイド率について

気液二相流の研究においてボイド率は重要な変数である。この節ではボイド率の定義について述べておく。二相流を瞬時局所場の方程式として記述する場合のボイド率の定義は、空間時間に対して

$$\alpha(x, y, z, t) = \begin{cases} 0 & (\text{液相}) \\ 1 & (\text{気相}) \end{cases}$$

という不連続な関数形で現される。乱流の流れ場は様々なスケールの乱れを含んでいるため平均値の方程式形で記述されるのが一般的でありアンサンブル平均化する場合もあるが、通常は適当な時間 T で積分した値

$$\overline{\alpha(x, y, z, t)} = \int_t^{t+T} \alpha(x, y, z, t) dt$$

を用いて、平均化されたボイド率として定義するのが適当である。積分時間 T は平均化操作にともなって生じる乱流項の構成式に関係するが陽には現れてこない。 T は乱流による微細な変動に比べて十分大きく、問題とする変動に対しては十分小さく取ることになる。

この平均ボイド率がもつとも一般的なボイド率の定義となるが実際にはさらに平均化したもの用いることが多い。ラジオグラフィではビーム方向の積分画像が得られるので、ビーム方向を z 軸とし流路厚さの分布を $D(x, y)$ とすると計測できるボイド率は、

$$\overline{\alpha(x, y, t)} = \int_0^D \alpha(x, y, z, t) dz$$

の形になる。ここで流路の厚みが一定で流れが x, y の2次元流であると仮定できるならば、この値は一般的な平均ボイド率に等しい。流路厚さが一定でない場合については検討を要する。

3. 画像処理法

物体による放射線の減衰は一般に次式であらわされる。

$$I = I_0 \exp(-\rho \mu t) \quad (1)$$

ここで I, I_0 は物体への入射前後の放射線強度、 ρ, μ は物体の密度と物体と放射線によって決まる質量減衰係数、 t は放射線方向の物体の厚みである。容器内の気液二相流の放射線を照射した場合の減衰は、容器の壁と液相、気相で起こるので、添え字 w, L, G を用いると式(1)より、

$$I = I_0 \exp(-\rho_w \mu_w t_w - \rho_L \mu_L t_L - \rho_G \mu_G t_G) \quad (2)$$

気相の密度は液相に比べ無視できるので式(2)の指數関数内の第3項は無視できる。透過画像の各画素の輝度の分布が放射線の量に比例すると考えると、

$$S(x, y) = G(x, y)I(x, y) + O(x, y) \quad (3)$$

ここで $G(x, y)$, $O(x, y)$ は各画素におけるゲインとオフセットであり、コンバータと撮像系により決定されている。式(2)において、透過方向に平均したボイド率分布 $\alpha(x, y)$ を考え、流路の厚みを t とし厚みの分布も加味すると透過画像の輝度分布は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S(x, y) &= G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_w t_w(x, y) \\ &\quad - [1 - \alpha(x, y)] \rho_\perp \mu_\perp t(x, y)\} \\ &\quad + O(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

撮影された画像の輝度をデジタイズし、式(4)で計算を行えば2次元ボイド率分布が計算されるが、コンバータや撮像系にむらがあつたり、壁や流路の厚みが空間的に変化しているような場合には計算は困難であり、以下に示すような画像処理法によりボイド率分布を求める。

式(4)にはゲイン、オフセット、壁、液相の減衰に関する未知量 $G(x, y)$, $O(x, y)$, $\rho_w \mu_w t_w(x, y)$, $\rho_\perp \mu_\perp t(x, y)$ が含まれており、これらの値が実験中に変化しないことを仮定して画像の演算により消去しボイド率分布を求めるを考える。

まずオフセット $O(x, y)$ は実験装置を設置して撮像系を調整した後、中性子線を止めた状態で画像を撮影すれば測定できる。

次に容器を空の状態、即ち $\alpha(x, y)=1$ の画像を撮影しその輝度分布を $S_1(x, y)$ とすると

$$\begin{aligned} S_1(x, y) &= G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_w t_w(x, y)\} \\ &\quad + O(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

容器内に水を満たした状態、即ち $\alpha(x, y)=0$ の画像の輝度分布を $S_0(x, y)$ とすると

$$\begin{aligned} S_0(x, y) &= G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_w t_w(x, y) \\ &\quad - \rho_\perp \mu_\perp t(x, y)\} \\ &\quad + O(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

$O(x, y)$, $S_0(x, y)$, $S_1(x, y)$ をあらかじめ測定しておいて二相流の画像 $S(x, y)$ を測定すると4枚に画像情報をもとに式(4)の未知量を消去して次式によりボイド率分布が測定できる。

$$\alpha(x, y) = \frac{l n \left\{ \frac{S(x, y) - O(x, y)}{S_0(x, y) - O(x, y)} \right\}}{l n \left\{ \frac{S_1(x, y) - O(x, y)}{S_0(x, y) - O(x, y)} \right\}} \quad (7)$$

この方法では気相による減衰が無視できる限りは、液体と壁の材質や流路と壁の形状について、あらかじめ何等の情報がなくともボイド率分布を定量的に可視化できることになり、形状が複雑であったり作動液や容器の材質や構造がよく解らないような機器内の二相流についてもボイド率分布の計測が行えることになる。

式(7)において二相流の画像に時間積分を施したもの用いれば時間平均の分布型を得ることができ、動画像を用いれば非定常の変化を見ることができる。

3. 実験装置

Fig. 1 に実験装置を示す。試験部はアルミ製の矩型容器であり、厚み 10 mm、縦横 200 mm の水槽の底部中央に窒素ボンベより窒素ガスを注入し容器内の二相流を形成する。光学的な観察のためには容器の壁をアクリル樹脂板に交換できるようになっている。窒素ガス流量は臨界ノズルにより一定値に設定する。気泡の生成には内径 0.5 mm、外径 0.8 mm、長さ 10 mm の注射針を 5 mm 間隔で 4 本、2 列の計 8 本から窒素ガスを注入して 2-3 mm 程度の気泡を発生させた。

4. 結果

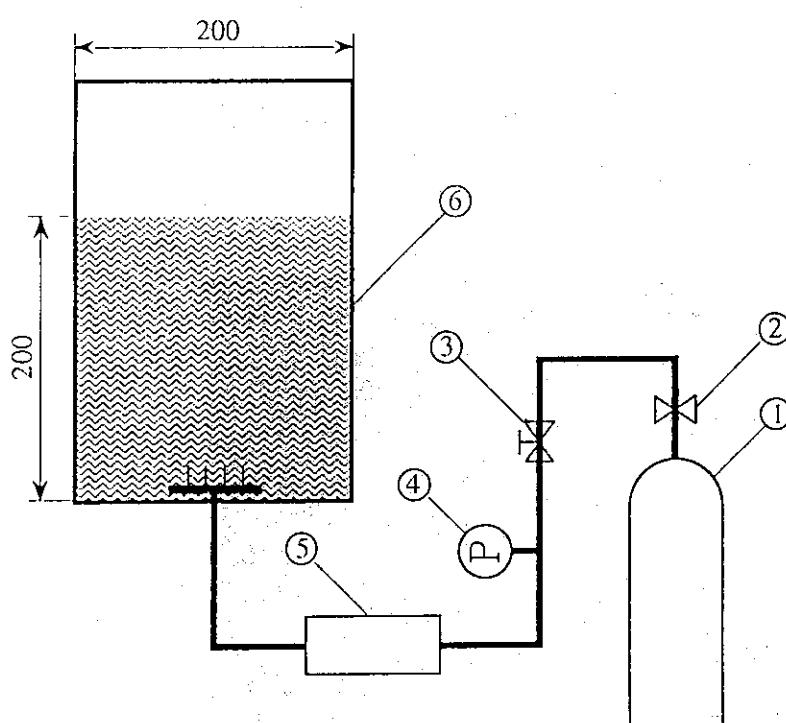
非定常二流体モデルの基礎式は時間またはアンサンブルで平均化されたものであり、実時間で得られる画像とは異なったものになる。このような解析結果と画像処理によって得られたボイド率分布を比較するために、実験の画像に平均操作を行う必要がある。画像のアンサンブル平均を行うことは容易ではないので本研究では時間平均を行った。具体的には、流れ全体の変動周期よりは十分に遅いが個々の気泡が流れて局所的な平均ボイド率を示す程度の時間平均を行う。

Fig. 2 (a), (b) は透過可視光による 30 フレーム毎秒のビデオ画像の 1 フレーム、8 フレーム平均、の例である。(a) では気泡ブルーム両側の渦の部分で巻き込まれた気泡の速度が余り速くないため気泡の形状がはっきりと移っているが(b) では平均化され濃淡の形でみることができる。この条件でのブルームの揺動周期は数秒程度であるので全体の周期を平均化してしまうことはない。平均化することにより濃淡が得られるが、この輝度は直接のはボイド率に関係するものではなく定性的な議論はできても定量的に解析結果と比較できるものではない。Fig. 3 (a), (b) は 1 フレームと 8 フレーム平均の中性子ラジオグラフィによる透過画像に上記の画像処理を施した例である。画像処理の関係で本来の自由表面より上の部分は求められない。図横の輝度バーはボイド率 0 から 1 までを 16 分割して示しており、気泡流でのボイド率の上限と考えられる 30 % の範囲内で輝度が変化するように調節してある。ビデオではこの輝度を疑似カラーで示している。また輝度の平均を行ってから式(6)の変換をしたのではボイド率の平均ではなくボイド率の指數関数を平均したものになってしまうので 1 フレームごとに式(6)の変換を行った後に平均してある。(a) では渦部に大きな気泡がみられるが(b) では、ほぼ均一な濃淡を見ることができる。針を出てすぐは気泡の速度が遅く広がっていないのでボイド率が一番高くなっていること、上昇にともない気泡速度が速くなりさらに広がっていくことによりボイド率は低下していくが自由界面近くでは淀むためにボイド率が高くなることがよく解る。

5. 結論

非定常多次元二相流解析のベンチマーク試験用の実験データを得ることを目的として実時間中性子ラジオグラフィによる2次元ボイド率の定量的な可視化を行なった。このようなデータをもとに解析モデルの整備が行える。

- 文献 (1) 富山ら、日本機械学会関西支部第69回講演会
 (2) Mishima,K. et al., in "Dynamics of Two-phase Flow",
 CRC Press Inc., 141 (1992)
 (3) Inoue,A. et al., 2nd.ASME/JSME Nucl.Engng.Conf. Vol.1, 39 (1993)
 (4) Hori,K. et al., ibid, 69
 (5) Takenaka,N. et al., Flow Meas.Instrum. Vol.1, 149 (1990)



- | | |
|---------------------|------------------|
| ① Nitrogen Gas Bomb | ④ Pressure Gauge |
| ② Regulator | ⑤ Sonic Nozzle |
| ③ Valve | ⑥ Test Section |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

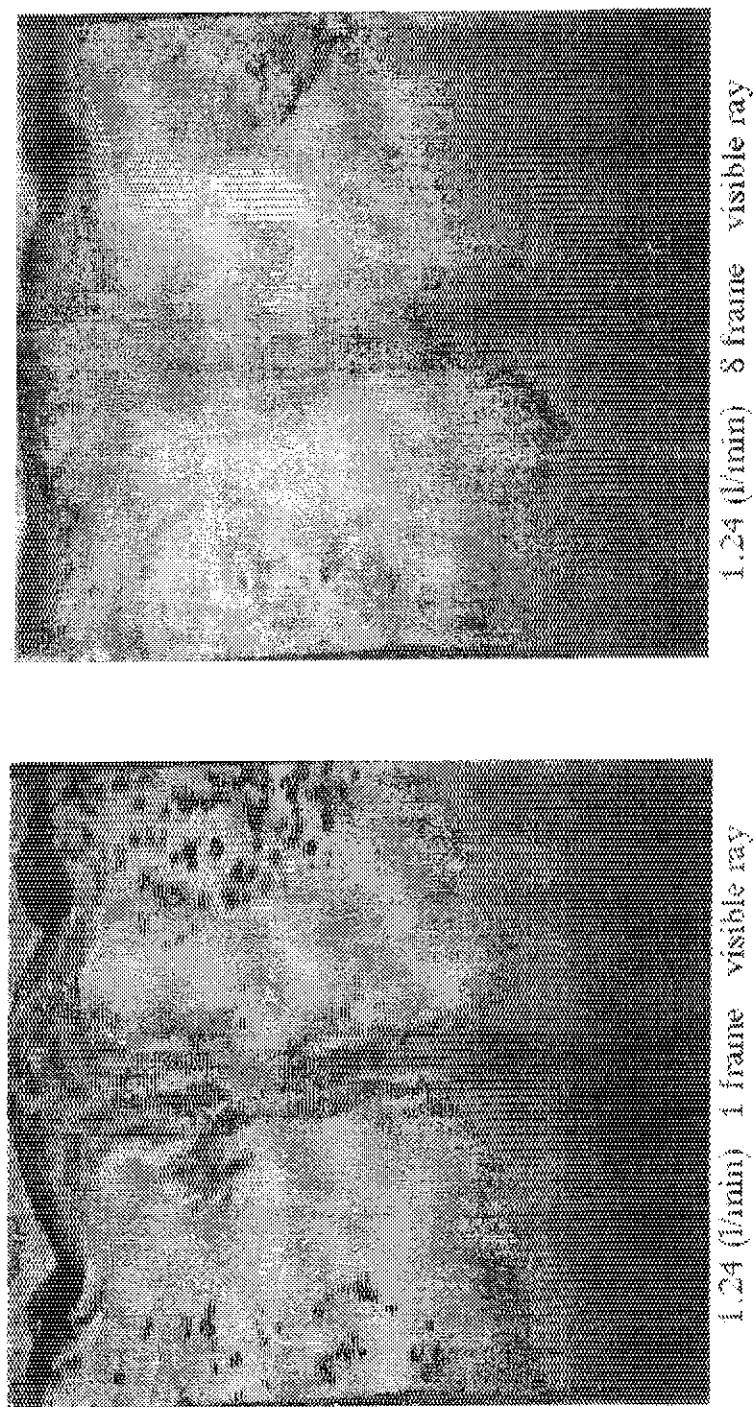


Fig. 2 Optical images

(a) original
(b) time-averaged

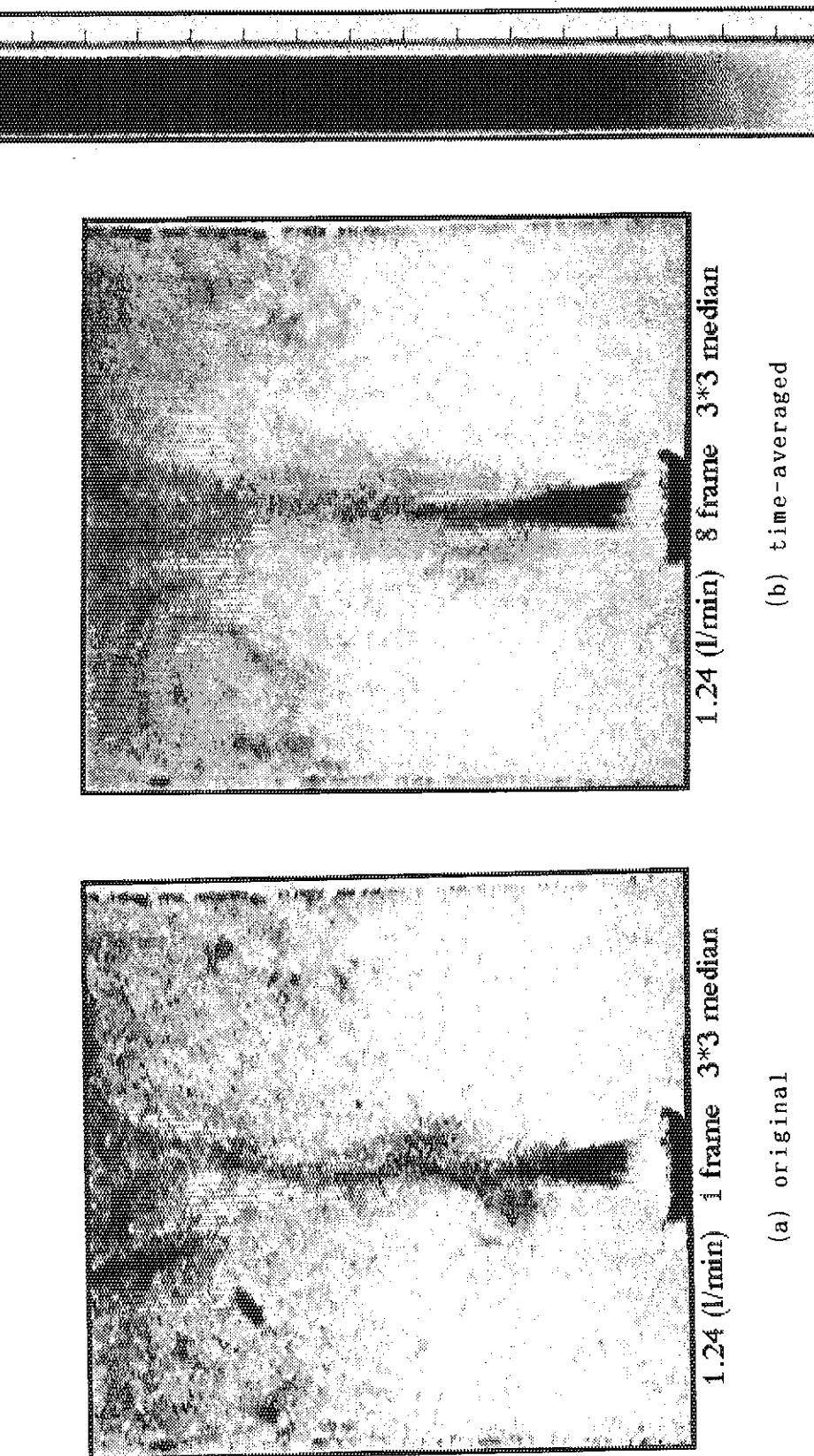


Fig. 3 Neutron Radiography images

4.4 中性子ラジオグラフィによる宇宙用排熱システムの伝熱管内の可視化

中澤 武

神戸商船大学 商船学部

1. はじめに

非破壊検査への応用をめざして開発された中性子ラジオグラフィによる可視化手法はX線を使った可視化法と同様、物質内での放射線の減衰の差を利用して画像を得る放射線透過法の一つである。しかし中性子の質量減衰係数の違いからX線による透過画像とは異なった特徴を持ち、特に金属内の液体の可視化に対して有効である。従ってこの手法は、航空機のハニカム構造翼内の腐食、湿気検査をはじめ金属管内の液体挙動や液体金属の可視化技法として利用されているほか、文化財の調査など幅広い分野での応用が報告されている^{(1), (2)}。

ここでは、中性子ラジオグラフィによる可視化技術の一つの適用例として、宇宙環境下での使用を目的とした二相流体ループ排熱システムの可視化実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 宇宙環境下における排熱システム

地球近傍の軌道上にある人工衛星の温度は、太陽光の照射と太陽光の地球表面での反射成分、および地球自体からの赤外放射成分などの受熱量と搭載機器の内部発熱量の和と、衛星外表面から放射されるの排熱量の収支バランスで決定づけられている。従来の小形衛星クラスでは衛星の表面コーティングや断熱材の使用によって最適な温度範囲に調整してきた。また近年のスペースシャトル程度の規模の宇宙船では、搭載電子機器類および消費電力の増加に伴い、これらの熱源から宇宙空間まで効果的に熱を輸送するヒートパイプや単相流体ループを用いた排熱システムが利用されている。しかし、将来の宇宙船の大型化や宇宙ステーションならびに月面基地の開発においては、より大きな動力源の要求とそれに伴う大容量の熱輸送能力をもつ排熱システムが必要となる。この場合ヒートパイプや単相流体ループによる排熱システムでは、システムの大型化による重量の著しい増大等につながる。これらの問題に対し、最近熱輸送媒体の相変化を利用した二相流体ループによる排熱方式が有望視されている⁽³⁾。この方式は、流体の相変化現象を利用するため良好な熱伝達性能が得られ、熱輸送媒体の単位質量当たりの輸送熱量が増大し、ポンプ動力の軽減およびシステム全体の軽量化につながり、さらに温度制御がシステム圧力によって行える

などの利点を有する。しかし、現時点では宇宙空間の微小重力環境下における気液二相流の挙動については不明確な点が多く、二相流体排熱システムの実用化のための最適設計基準は未だ確立されているとはいえない。

宇宙環境下で使用される二相流体ループ⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾では、重力下における相関式や構成方程式をそのまま利用することは適当でないと考えられ、現象を的確に表現した構成方程式を得る必要がある。このためには、気液二相流の特性に強い影響をおよぼしている流動様式に関する情報が重要で、複雑に変化する現象を的確に把握するためには、特に流動様式の把握が必要である。可視化の手法にはテストセクションを透明にし、目視あるいは高速度ビデオなどの録画装置を利用する方法が一般的であるが、微小重力下で顕著になる毛細管力を得るために、伝熱要素内に細かい溝やウィックを設けた形式が多く、前述の可視光による可視化の障害になることが少なくない。そこで、ヒートパイプ内や金属管内の流動の可視化手法として実績のある中性子ラジオグラフィによる可視化技術を利用して伝熱管内の可視化実験を実施した。

3. 可視化実験用二相流体ループ

本実験ループは、Fig. 1 に示すように蒸発部、凝縮部、メカニカルポンプおよびアクチュエータから構成され、蒸発部と凝縮部に毛細管構造を有する伝熱管を使用した基本的な二相流体ループである。可視化の対象とした蒸発部の伝熱管は Fig. 2 に示すように中央部を貫通する液流路の周辺にメッシュを積層したブロック体を持つ構造になっており、液流路に供給された作動流体は、周辺のメッシュ部に浸透しながら蒸発し、伝熱管上半に軸方向にもうけられた蒸気流路を通って流出する。また、余剰液は液流路を通って流出する。凝縮部の蒸気流路に流入した二相流体はここで冷却され液化し、液流路を通ってポンプ吸入側へ戻る。蒸発部での加熱および凝縮部での冷却は電気ヒータと冷水の循環によって行った。

可視化実験は、日本原子力研究所東海研究所の研究用原子炉JRR-3M.を利用して行った。Fig. 3 に JRR-3M.に設置された

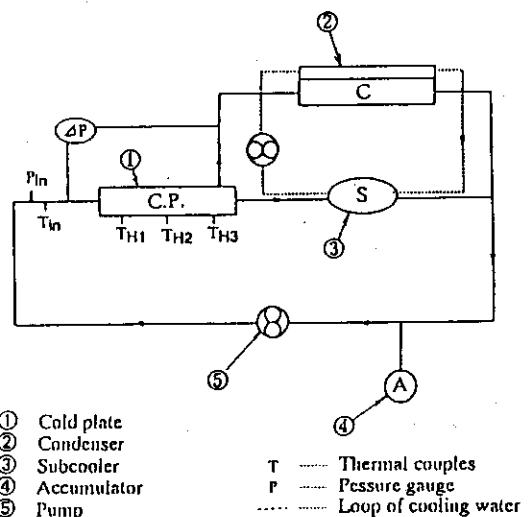


Fig. 1 Schematic diagram of the test section.

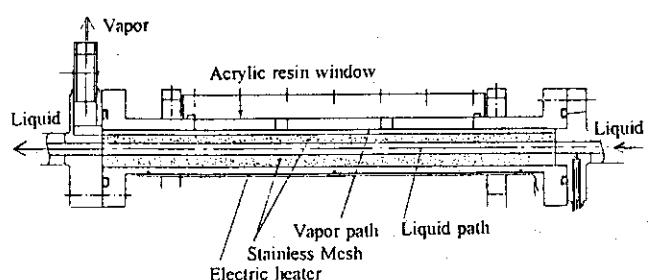


Fig. 2 Details of the evaporating tube.

た NRG 装置の概要を示す。この NRG 装置は高い熱中性子束と良好な n/γ 比により試料の動態観察をリアルタイムで行うことができるため、撮像法は実時間法（中性子テレビジョン）によって行った。また、可視化画像は武藏工業大学の動画用 NRG システムを用いてシェーディング補正およびカラー処理し VTR に録画記録した。

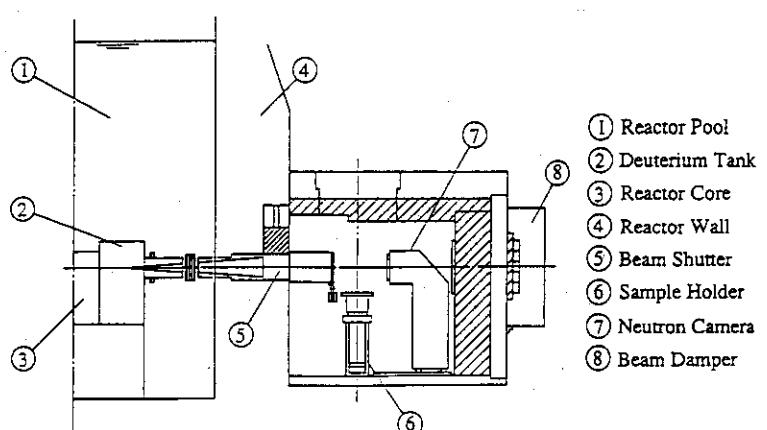


Fig. 3 Schematic diagram of NRG system of JRR-3M.

4. 実験結果

可視化の対象としたループの蒸発部と凝縮部の外観写真を Fig. 4 (a), (b) に示す。 (b) は、試験部からの放熱を防ぐためにグラスウール製の断熱材を施した後のもので、可視化実験はこの状態で行った。得られた可視化画像の一例と画像上の要素配置図を Fig. 5 (a),(b) にそれぞれ示す。図は加熱量 64W における定常運転時のもので、蒸気流路内が完全に気相状態になっていることが確認できる。

次にループの起動時の伝熱管内部の状況を観察するための実験では、蒸発管内部のメッシュ部における沸騰状況を明確に把握するため、メッシュ部をズームアップした状態での可視化実験を実施した。Fig. 6 に起動時の伝熱管中央部の壁面温度 T_2 、と伝熱管出入口の差圧 dP の変化を示す。また Fig. 7 は Fig. 6 中 A ~ D 各点における伝熱管内部の可視化画像を示したものである。液単相状態 A から加熱開始により蒸発が始まり B, C、定常状態 D へ至るまでの伝熱管内部の状況が可視化画像から得られた。また、Fig. 8 に示すように可視化画像の色調配分を変化させることによって伝熱管内に発生した小気泡を強調する事も可能で、本実験では 2mm 程度の小気泡の挙動を確認することができた。

5. まとめ

JRR-3M に設置された実時間 NRG システムを利用した可視化実験により次の結果を得た。

- (1) 従来の可視化手法では困難であった毛細管構造を持つ伝熱管内の沸騰蒸発現象を可視化する事ができた。
- (2) 実時間法により撮影されたビデオ画像により起動時の伝熱管内部の挙動が観察できた。
- (3) 画像処理手法を利用して、伝熱管内部に発生した小気泡の存在を強調することができ、気泡の発生状況が明確になった。

【謝 辞】

本実験を実施するにあたり、ご助力いただいた武藏工業大学工学部持木幸一助教授に謝意を表します。また、実験装置ならびに伝熱管を提供いただいた（株）東芝宮崎芳郎氏に謝意を表します。

《参考文献》

- (1) 増澤, 国立歴史民俗博物館研究報告, 第38集, (1992)
- (2) 三島, 竹中, 混相流, 第5巻, 2号, (1992)
- (3) 藤井, 混相流, 第6巻, 1号, (1992)
- (4) 藤井ほか, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992).
- (5) 宮崎ほか, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1988).

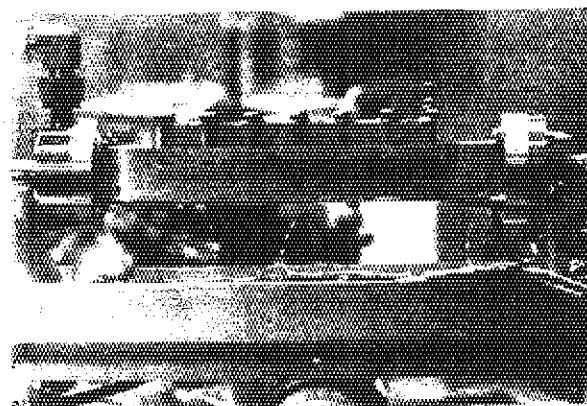
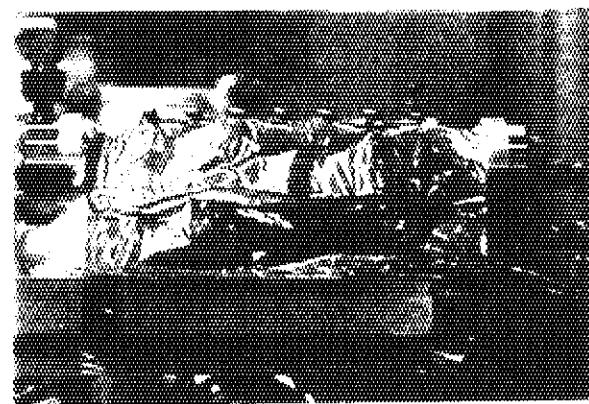


Fig. 4 (a) Appearance of the test section.



(b) Appearance of the test section with thermal insulator.

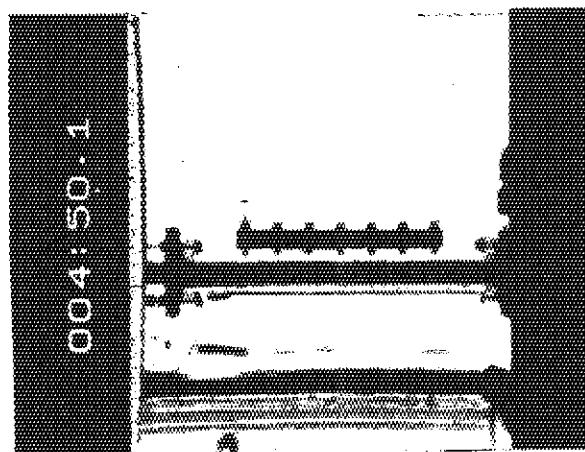
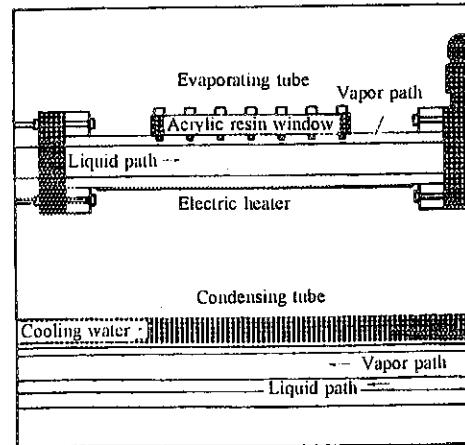


Fig. 5 (a) Image of the test section by neutron radiography.



(b) Arrangement of elements on figure 5(a).

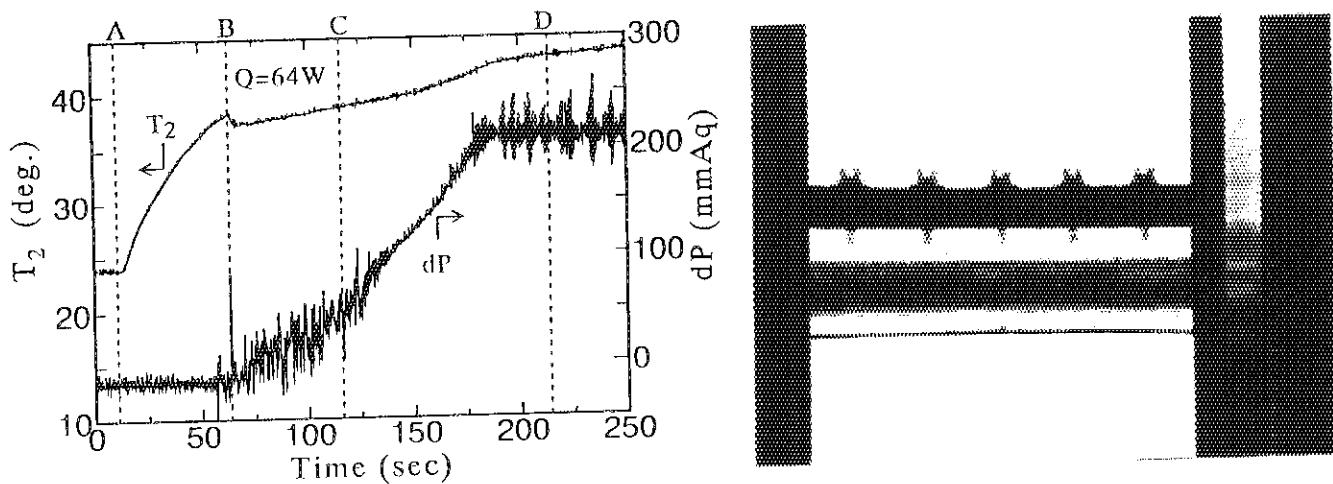


Fig. 6 Wall temperature and differential pressure of the evaporating tube on start-up condition.

Fig. 8 Image of bubbles in the evaporating tube.

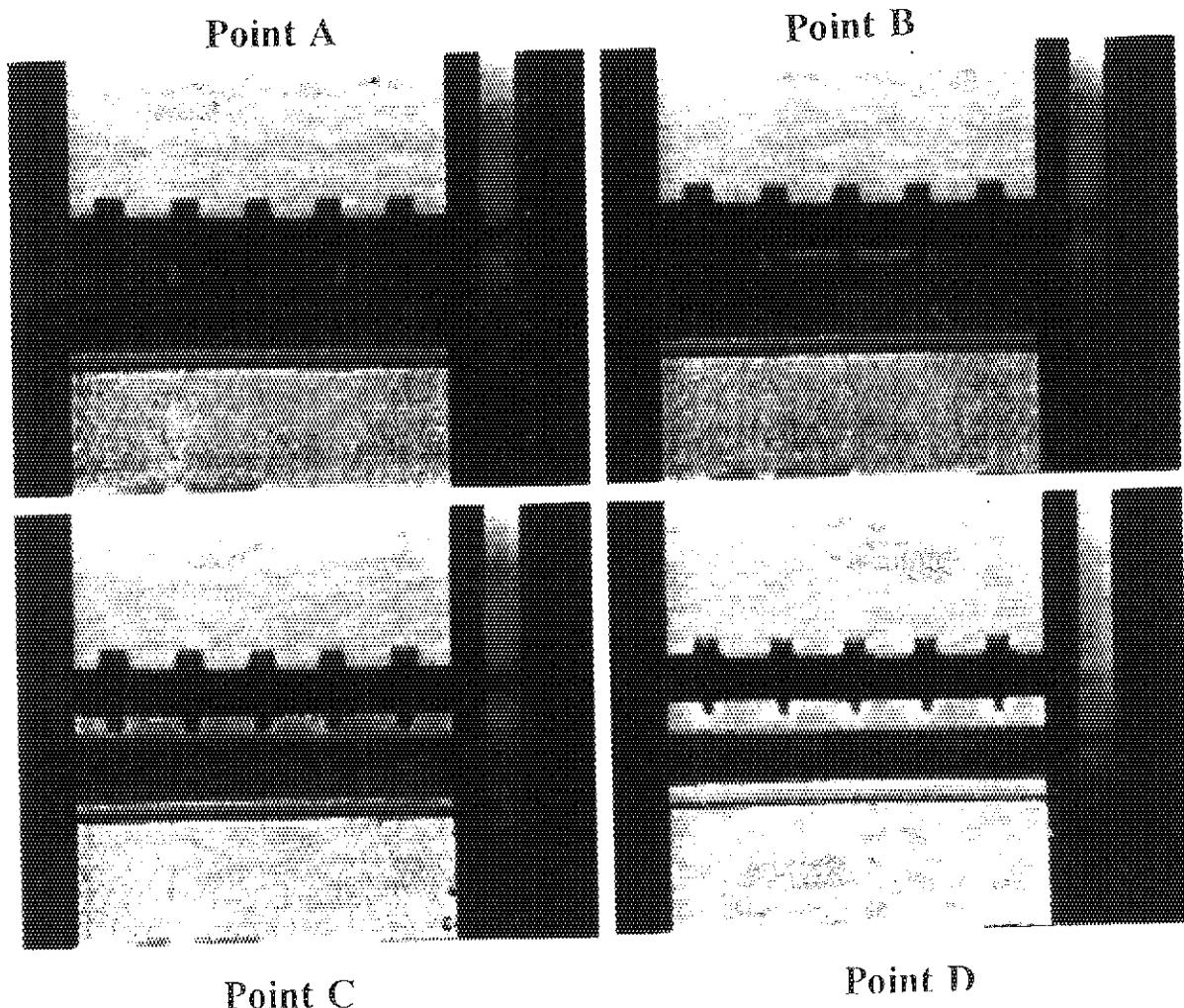


Fig. 7 Images in the evaporating tube at points A to D.

4.5 高速度ビデオを用いた高速流体现象の可視化

三島嘉一郎・日引俊・藤根成勲・米田憲司

京都大学 原子炉実験所*

1. 緒 言

本研究グループでは、これまで実時間中性子ラジオグラフィ法を用いて気液二相流の可視化と計測に関する研究¹⁾を行うとともに、高速流体现象の可視化に関する予備的な実験を行い、パルス中性子を用いたフィルム法による空気-水二相流の可視化²⁾、パルス中性子と高速度ビデオを用いた沸騰水二相流（録画速度：毎秒500フレーム）の可視化³⁾に関する研究を行っている。これらの高速流体现象のメカニズムの解明には、録画速度毎秒1000フレーム以上で、現象を長時間にわたって記録する必要があり、そのためには、中性子源として、高中性子束の定常出力研究炉を用いる必要がある。近年、日本でも撮像面で $10^6 n/cm^2 \cdot s$ 程度の中性子束が得られる研究炉が運転され⁴⁾、定常炉を用いた中性子ラジオグラフィによる高速流体现象の可視化と計測に関する期待が高まっている。

本研究では、上記の課題に対して、最新の技術を有機的に結合させ、定常炉における高速流体现象の撮像システムを構築し、その応用の一例として、MTR型燃料要素の冷却流路を模擬した狭間隙矩形流路内における空気-水二相流の高速度撮像を行った。

2. 撮像システム

2.1 中性子源

京都大学原子炉実験所のKyoto University Research Reactor (KUR：撮像面での熱中性子束 $1.2 \times 10^6 n/cm^2 \cdot s$)⁵⁾と高感度シンチレータである化成オプトニクス社のNRコンバータ、10万倍の光増幅能力を持つナック社の光増幅装置GIB-10と高速度ビデオシステムHSV-500を用いて行われた予備実験によると録画速度毎秒250フレームで画像がかすかに検出される程度であったことから、定常出力の研究炉を用いた録画速度毎秒1000フレー

* 〒590-04 大阪府泉南郡熊取町野田

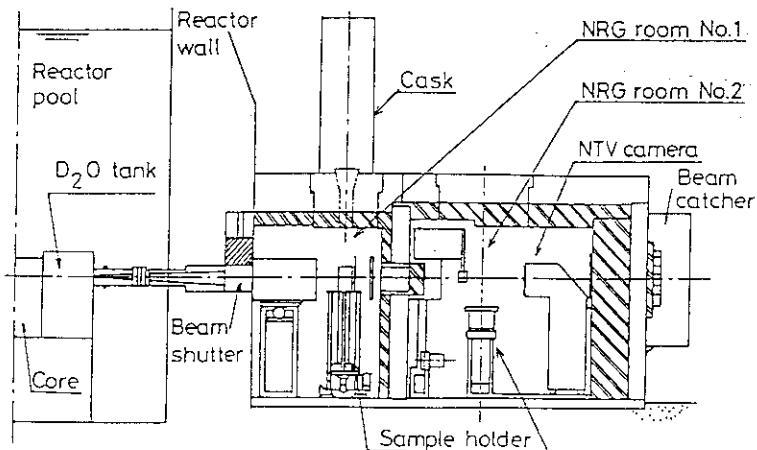


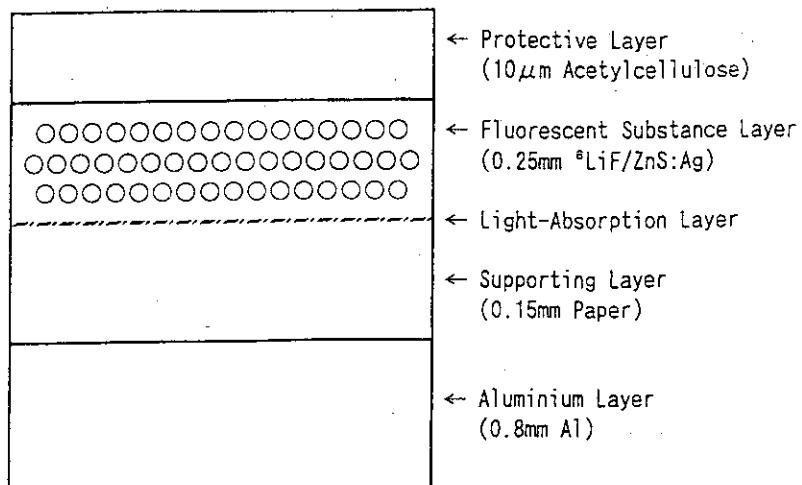
Fig.1 Schematic diagram of thermal neutron radiography facility of JRR-3M

ム以上での高速度撮像を実現するためには、撮像面で $10^8 n/cm^2 \cdot s$ 以上の中性子束が必要と考えられる。一般に、熱中性子ラジオグラフィ設備の性能の評価基準としては、以下の 4 点があげられる。

- (1) ビームが一様で強度が大きいこと。
- (2) カドミウム比が大きいこと。
- (3) 中性子線／ γ 線比が大きいこと。
- (4) L/D が 100 以上であること。

これらの基準から判断すると中性子ラジオグラフィによる録画速度毎秒 1000 フレーム以上の高速度撮像を可能にする定常炉は、サンディア国立研究所の Annular Core Research Reactor (ACRR)^{6,7)} や日本原子力研究所の Japan Research Reactor 3 (JRR-3M)⁴⁾ 等であると考えられる。本研究では、これらの中で JRR-3M を中性子源として選定し、実験を行った。

JRR-3M は、定常出力 20 MW のプール型研究炉であり、放射性物質観察用の熱中性子ラジオグラフィ設備第 1 撮像室 (TNRF1 : Thermal Neutron Radiography Facility No.1)、非放射性物質観察用の第 2 撮像室 (TNRF2 : Thermal Neutron Radiography Facility No.2) と冷中性子ラジオグラフィ撮像室 (CNRF : Cold Neutron Radiography Facility) の 3 つの NRG 撮像室を備えている。これらのうち本研究で用いた TNRF2 の概略図を Fig.1 に示した⁴⁾。TNRF のコリメータは、ダイバージェント型であり、視野は $255\text{ mm} \times 305\text{ mm}$ 、垂直方向、水平方向の L/D は、それぞれ、153、176 である。また、撮像面での



Composition of Fluorescent Substance Layer

Weight Ratio of ^6LiF to ZnS:Ag is 4 to 6.

Weight of $^6\text{LiF}/\text{ZnS:Ag}$ is about 45 mg/cm².

Particle size of ^6LiF is about 8 μm.

Particle size of ZnS:Ag is about 4 μm.

Fig.2 Schematic diagram of scintillator,
Kasei Optonix Co.,Ltd., NR converter

熱中性子束は、1. $5 \times 10^5 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。カドミウム比および中性子線-γ線比は、それぞれ、130、6. $25 \times 10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{mR}$ である。

2.2 高速度ビデオ⁸⁾

本研究では、高速度ビデオとして、1990年に開発された毎秒1000フレームの高速度撮像で21分間の記録が可能なナック社のHSV-1000、HSV-500を選定した。また、光増幅装置としては、ナック社で開発されたゲート式イメージインテンシファイアGIB-10を用いた。GIB-10の光増幅性能は、約100倍から10万倍程度である。その基本構成は、以下の通りである。

2.3 シンチレータ

本研究では、現在、感度が最も優れているといわれている化成オプトニクス社のNRコンバータをシンチレータとして実験に用いた。Fig.2に、NRコンバータの構造図と蛍光体層の構成を示した。

2.4 撮像および画像処理システム

Fig.3に2.2～2.3で選定した高速度ビデオ、光増幅装置、シンチレータのブロック図を示した。また、得られたNRG画像は、ピアス社の画像処理装置PIAS-IIIを用いて画像改善を行った。Fig.4に画像処理システムブロック図を示した。

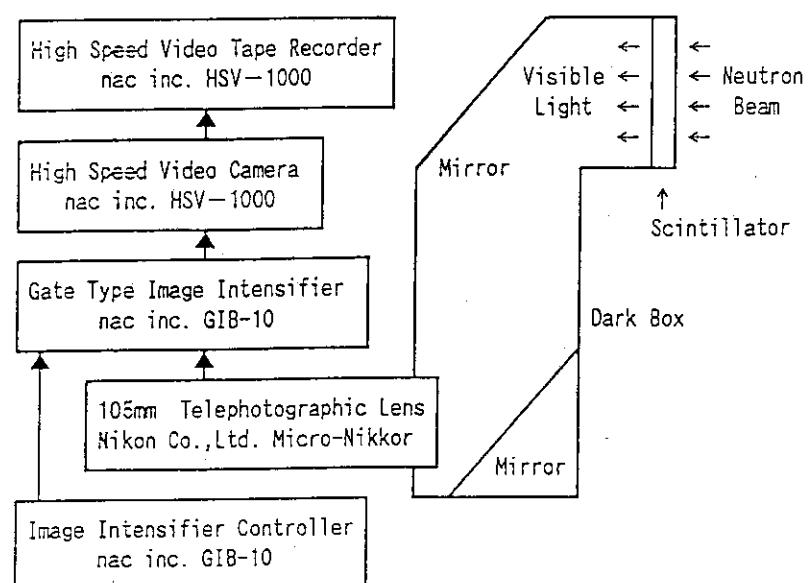


Fig.3 Block diagram of high frame-rate neutron radiography imaging system

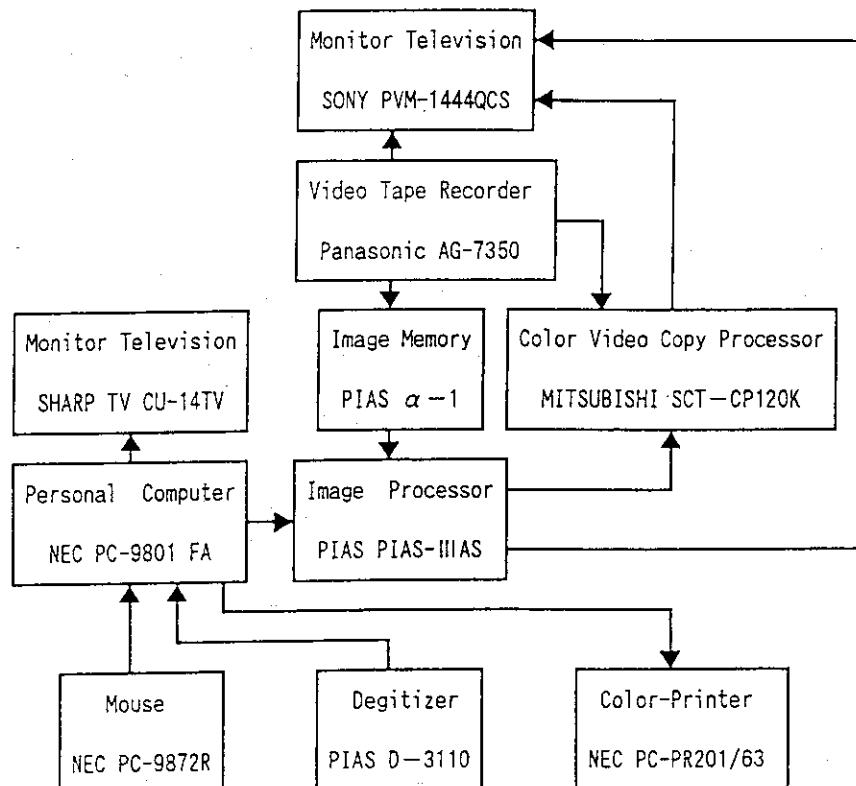


Fig.4 Block diagram of image processing system

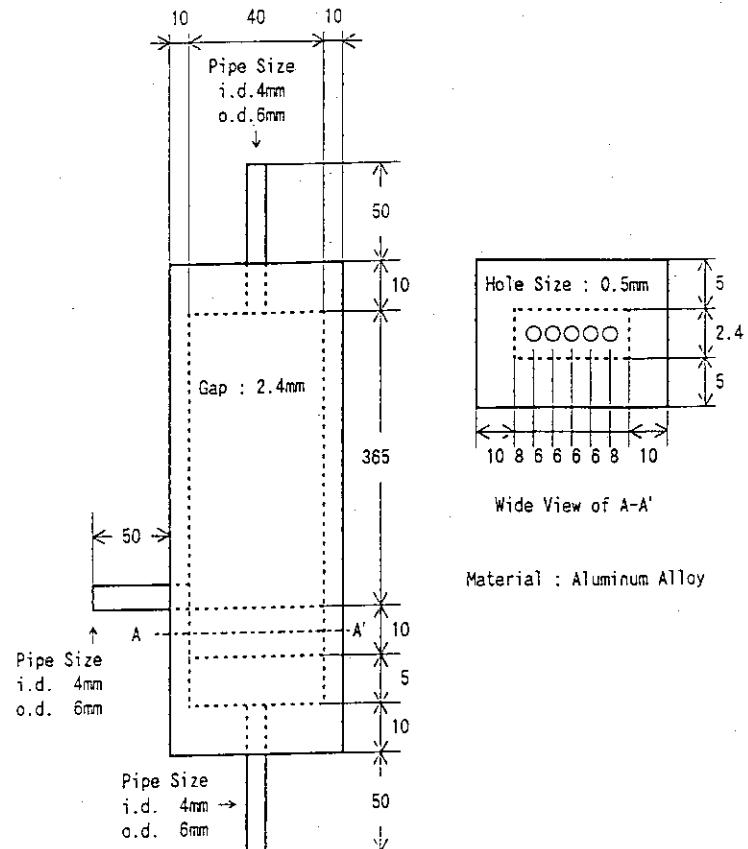


Fig.5 Schematic diagram of test section

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置の概略図をFig.5に示した。試験部として、MTR型燃料要素の冷却流路を模擬した間隙2.4mm、幅40mm、長さ365mmの狭間隙矩形管を、作動流体として、空気と水を用いた。実験ループの概略図をFig.6に示した。水は、ポンプによりループ内を循環する。エアーコンプレッサーから吐出された空気は、試験部入口の空気分散器の直径0.5mmの5つの小孔より試験部に供給され、水と混合されて二相流となり、試験部を通過した後、大気中に放出される。なお、二相流画像は、空気分散器から205mm下流の位置で撮像した。

3.2 撮像条件

実験には、録画速度毎秒1000(ハーフサイズ)および500フレームで撮像可能なHSV-1000と録画速度毎秒500(ハーフサイズ)および250フレームで撮像可能なHSV-500を用い、録画速度毎秒1000、500、250フレームで二相流画像の撮像を行った。

録画速度毎秒1000、500フレームでは、ゲート時間をノーマル(連続)モードに、ゲインを100%に設定した。この設定は、光増幅器の最高感度を与えるが、逆に得られるNR

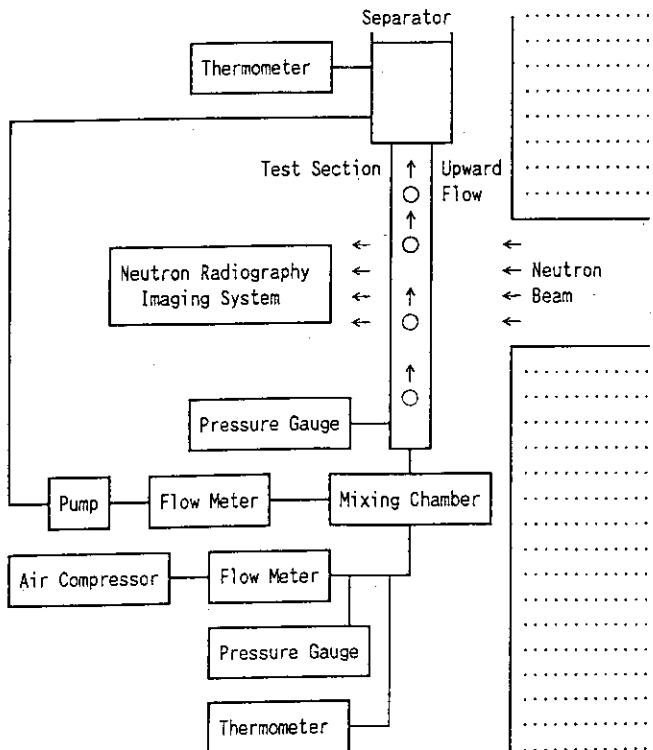


Fig.6 Flow diagram of test loop

G画像の画質は低下する。録画速度毎秒250フレームでは、ゲート時間を3.99ms、ゲインを70%に設定した。記録時間は、録画速度毎秒1000フレームの場合が2分、500フレームの場合が3分、250フレームの場合が1分30秒であり、その時間内で、流動様式を気泡流、スラグ流、チャーン流、環状流へと変化させ、画像収録を行った。

4. 結果と考察

4.1 NRG原画像

Figs.7-9に、それぞれ、録画速度毎秒1000、500、250フレームで撮像した二相流の原画像を示した。画像の中で白く見えている部分が空気層、黒く見えている部分が水層である。各図とともに(a)、(b)、(c)、(d)の流動様式は、それぞれ、気泡流、スラグ流、チャーン流、環状流に対応する。録画速度毎秒1000フレームの場合、画像が上下半分に分かれている。これは、録画時に、ハーフサイズで録画を行っているためである。したがって、下半分の画像は、上半分の画像の1/1000秒後の画像である。録画速度毎秒500および250フレームのNRG画像は非常に鮮明であり、界面にブレは少なく、気泡の流動状態、スラグ内の液滴の変化、環状流の液膜挙動が明瞭に観察可能であった。録画速度毎秒1000フレームの場合は、1フレームとしてみた場合、全体的に輝度不足であったが、連続再生による連続画像としてみた場合、流動機構の詳細を解明するには十分な画像であった。Fig.10に同じ試験部を用いて撮像した録画速度毎秒30フレームの画像を示した。その撮像システムは、既

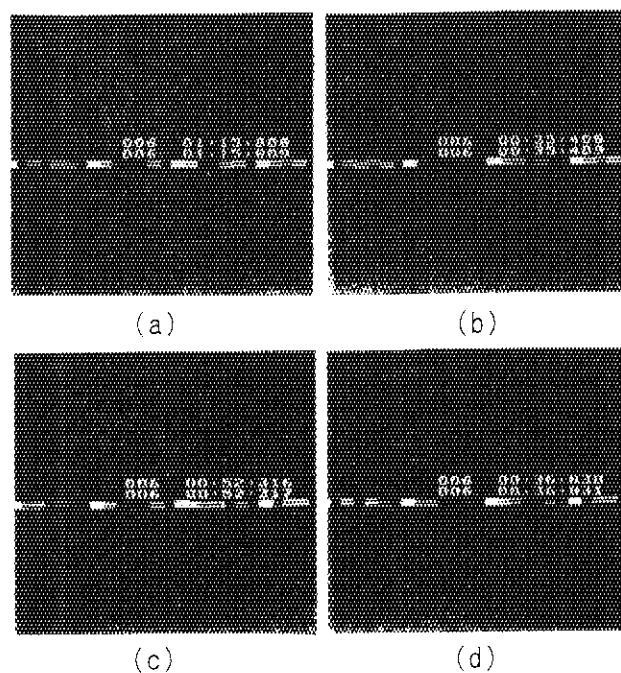


Fig.7 Neutron radiographs of air-water two-phase flows in a rectangular duct with 2.4mm gap taken by a high speed video at 1000 frames/s
(a) bubbly flow, (b) slug flow, (c) churn flow, (d) annular flow

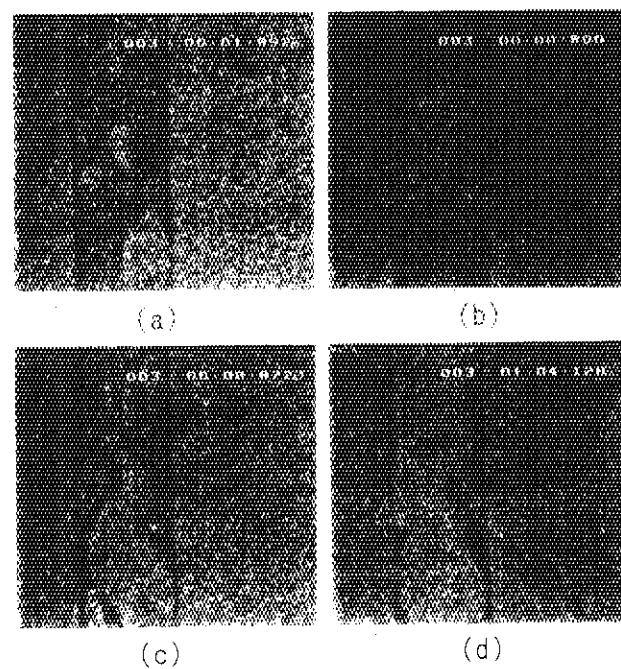


Fig.8 Neutron radiographs of air-water two-phase flows in a rectangular duct with 2.4mm gap taken by a high speed video at 500 frames/s
(a) bubbly flow, (b) slug flow, (c) churn flow, (d) annular flow

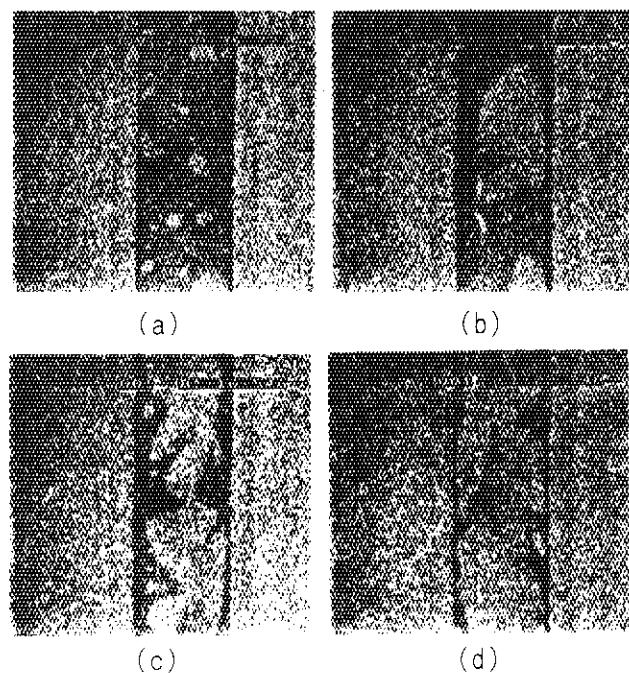


Fig.9 Neutron radiographs of air-water two-phase flows in a rectangular duct with 2.4mm gap taken by a high speed video at 250 frames/s
(a) bubbly flow, (b) slug flow, (c) churn flow, (d) annular flow

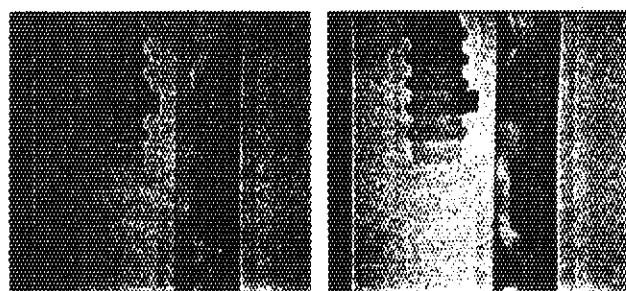


Fig.10 Neutron radiographs of air-water two-phase flows in a rectangular duct with 2.4mm gap taken by a real time imaging system at 30 frames/s

報³⁾の通りである。流路の左下に筋状に上っていく空気層は、連続再生から3つの気泡であることが判明しているが、毎秒30フレームの撮像速度では、残像により界面が明瞭ではなく、その同定は不可能である。このように高速で移動する物体の界面状態を定量化する場合には、前述の高速度撮像技術が必要となる。

4.2 NRG連続画像

Figs.11-14に、各流動様式の80ms間の連続画像を示した。撮像は、HSV-500を用

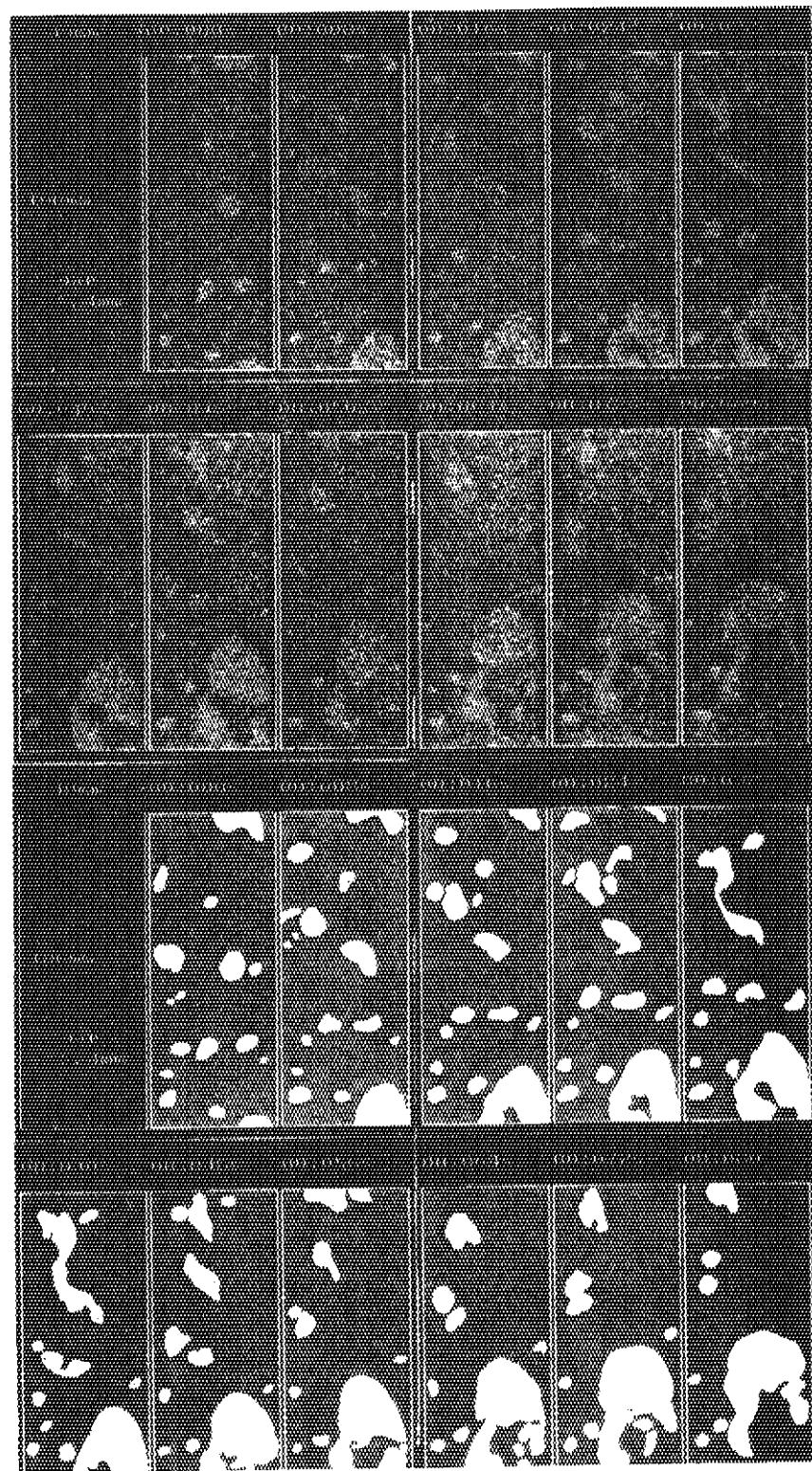


Fig.11 Consecutive frames and its processed images from a high speed video sequence showing bubbly flow in a rectangular duct with 2.4mm gap

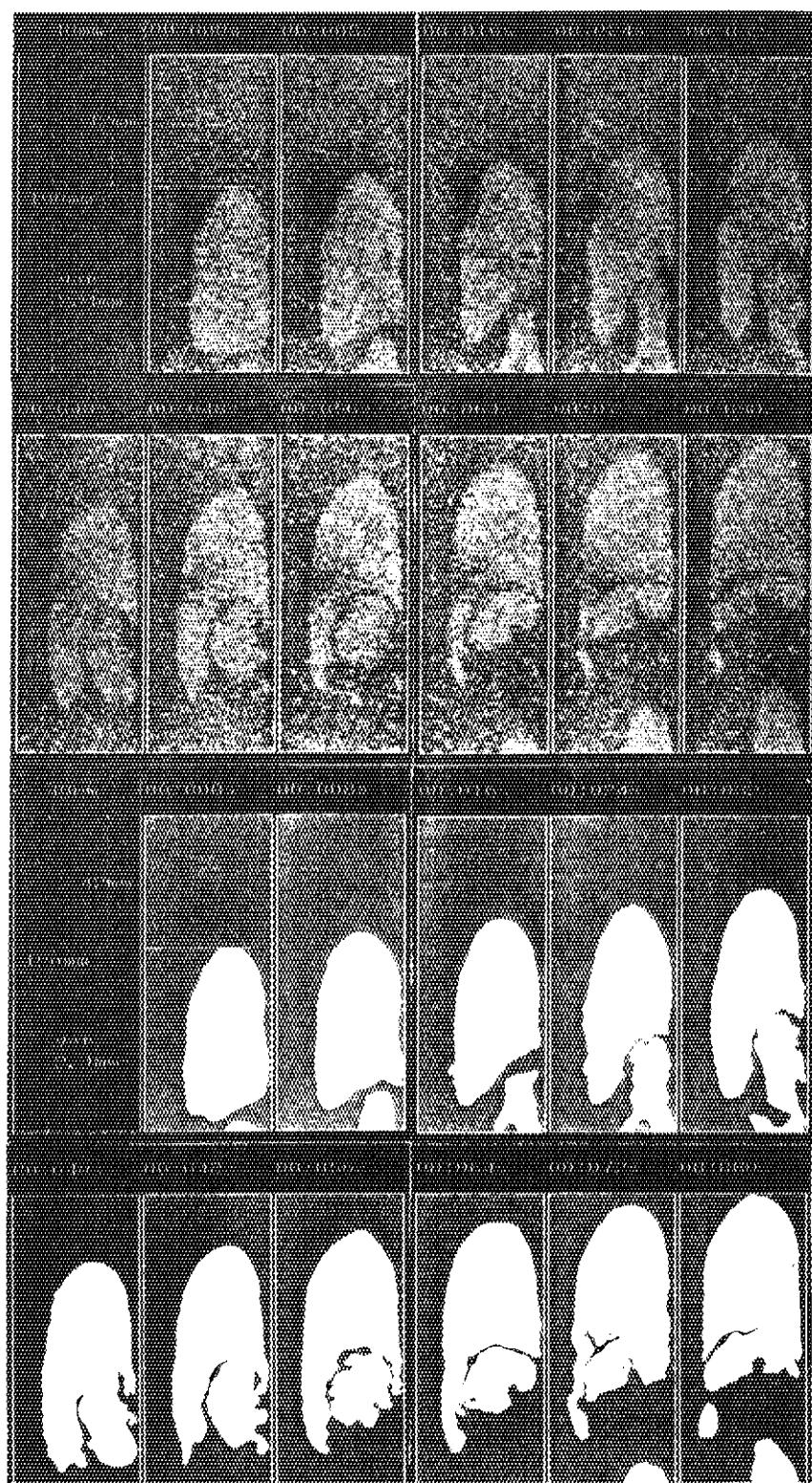


Fig.12 Consecutive frames and its processed images from a high speed video sequence showing slug flow in a rectangular duct with 2.4mm gap

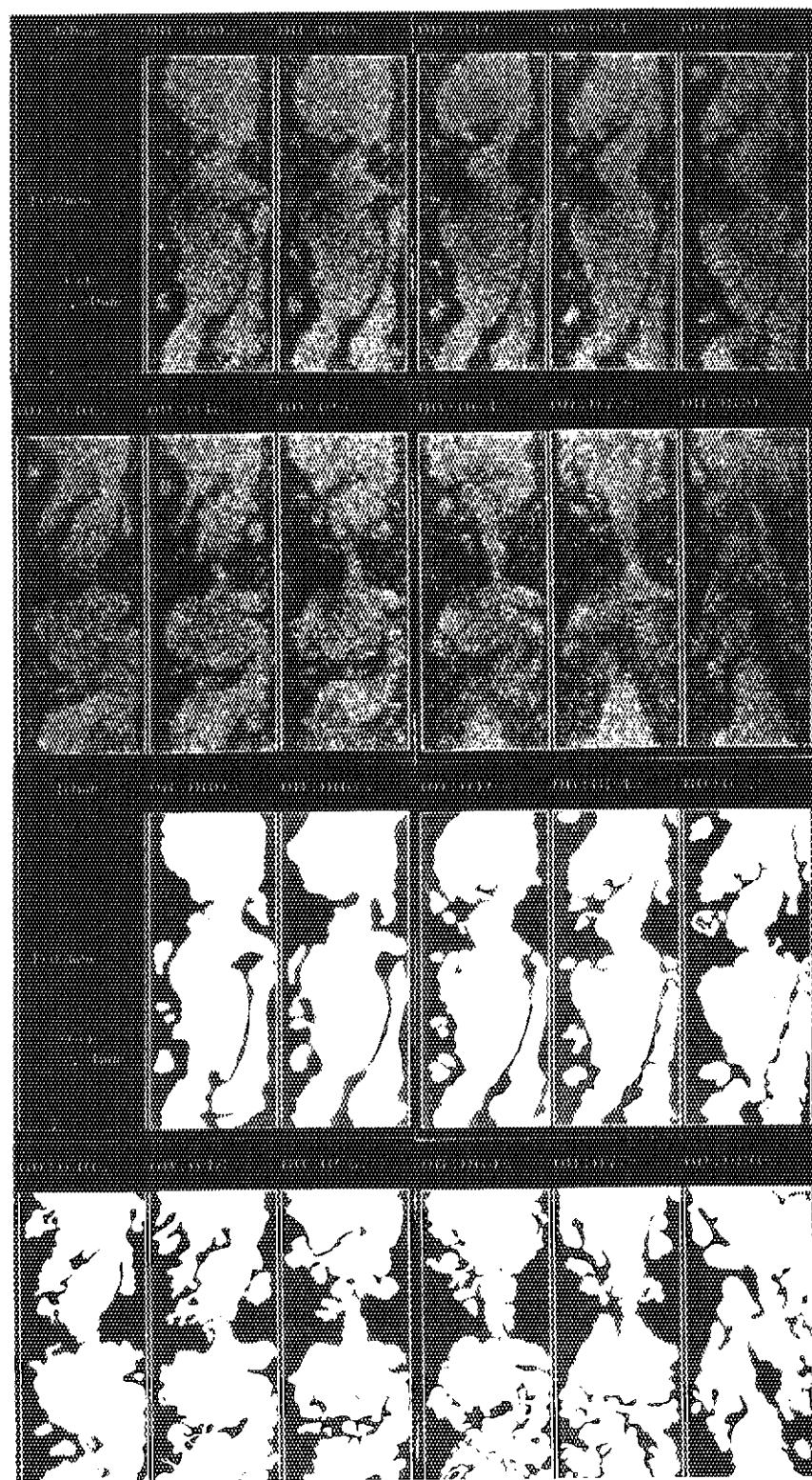


Fig.13 Consecutive frames and its processed images from a high speed video sequence showing churn flow in a rectangular duct with 2.4mm gap

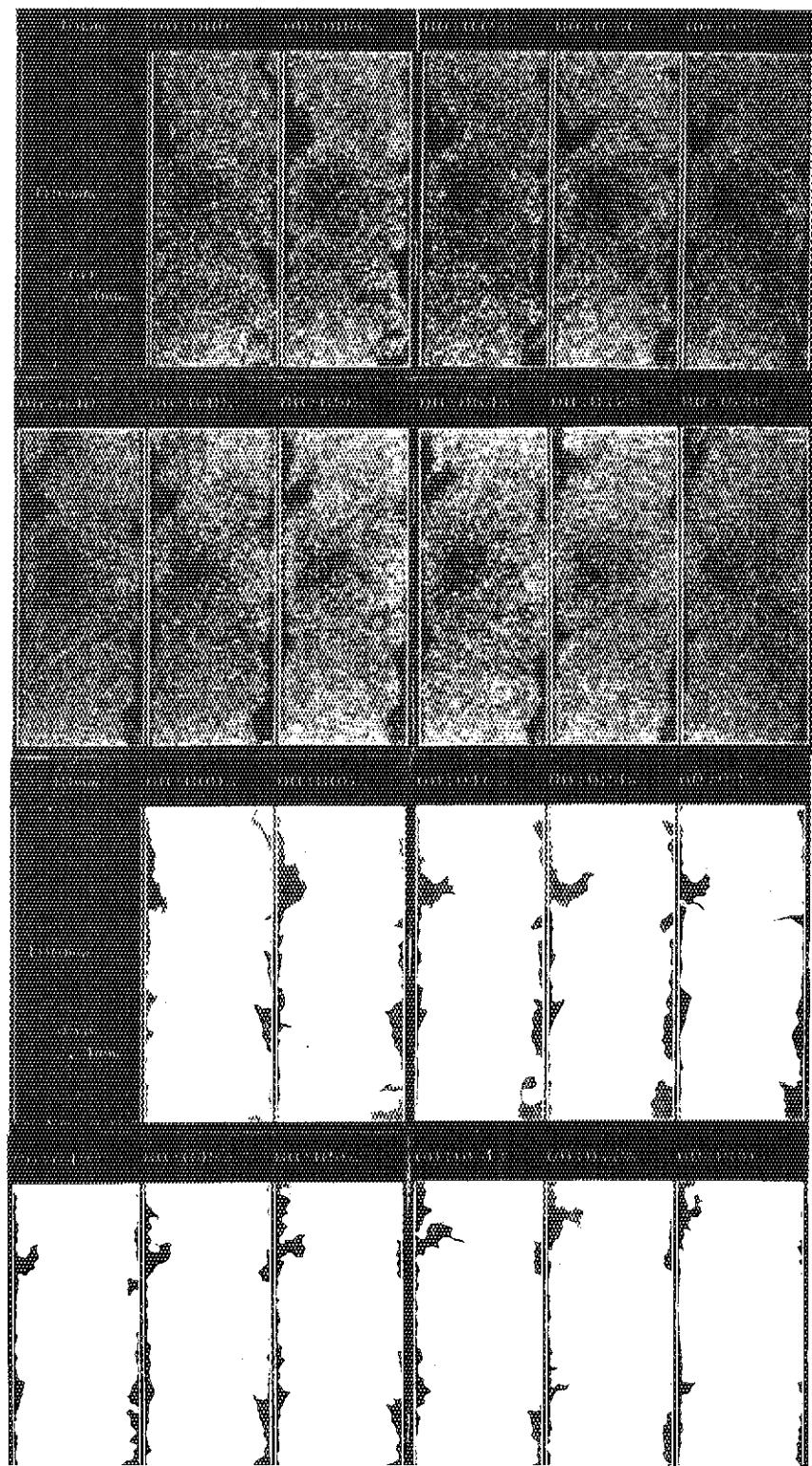


Fig.14 Consecutive frames and its processed images from a high speed video sequence showing annular flow in a rectangular duct with 2.4mm gap

い、録画速度は、毎秒250フレームに設定した。流動様式の変化を強調するために、画像は、1/125秒毎に示した。各図の上半分の画像は、NRG画像を画像処理装置で256階調にデジタル化した画像であり、下半分は、デジタル化画像の特徴を捉るために二値化処理等の画像処理を施された画像である。各図に示した通り、各画像の縦は100mm、横は40mmに相当する。

Figs.11,12より、それぞれ、先行する小気泡に続き、キャップ型気泡が上昇していく様子や先行スラグと下流側から接近してきた後方スラグが合体している様子が明瞭に観察できる。また、Figs.13,14より、それぞれ、液膜内に同伴された気泡が移動していく様子や液膜の成長の様子が観察できる。また、Fig.12よりそのスラグ気泡は、80msの間に42mm移動していることから、その移動速度は、 52.5 cm/s であることがわかる。以上のように、定常炉を用いた中性子ラジオグラフィによる高速流体现象の可視化技術の確立により、気泡の上昇速度のような定量的データが得られると同時に、液膜挙動を調べることにより流動様式の決定や流動のメカニズムの解明が可能になると考えられる。

5. 結 言

定常出力の研究炉から発生する熱中性子を用いて、金属管内における高速流体现象の可視化実験を行った。中性子源としては、撮像面で $1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の熱中性子束を有する日本原子力研究所のJRR-3Mの熱中性子ラジオグラフィ設備TNRF2を用いた。撮像システムとしては、高感度の $^{6}\text{LiF}/\text{ZnS:Ag}$ シンチレータと増幅能力10万倍の光増幅装置を備え、録画速度毎秒1000フレームで撮像可能な高速度ビデオを用い、中性子ラジオグラフィを用いた高速度撮像システムを構築した。この撮像システムを用い、間隙2.4mm、幅40mmの流路を持つアルミニウム製矩形管内の空気-水二相流の撮像を行った。本撮像システムにより定常出力の熱中性子を用いて、録画速度毎秒1000フレームの高速度撮像に成功した。得られたNRG連続画像より管内の気泡および液膜形状とその流動状態が明瞭に観察でき、スラグ気泡の上昇速度の計測、流動様式の判別が可能であった。本システムは、可視光の透過しない研究体系での高速現象の可視化、計測に非常に有効な手段であることを示した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご助力頂いた日本原子力研究所東海研究所研究炉部長白井英次氏、研究炉技術開発室長古平恒夫氏、研究炉技術開発室鶴野 晃氏、松林政仁氏、新大阪商會安當業部課長中村高義氏に謝意を表する。また、実験面でご助力頂いた放射線照射振興協会 安藤 均氏、株ナック 安藤幸司氏、早川 聰氏、福田幸三氏に謝意を表する。

引用文献

- 1) Mishima,K.,S.Fujine,K.Yoneda,K.Yonebayashi,K.Kanda,H.Nishihara,"A Study of Air-Water Flow in a Narrow Rectangular Duct Using an Image Processing Technique", Dynamics of Two-Phase Flow,Eds. O.C.Jones,I.Michiyoshi,pp.141-160(1992)
- 2) Mishima,K.,K.Yoneda,S.Fujine,K.Kanda,H.Nishihara,K.Yonebayashi,M.Sobajima, S.Ohotomo,"An Application of Neutron Radiography and Image Processing Techniques to Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Narrow Rectangular Duct",Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ.,vol.22,pp.133-141(1989)
- 3) Hibiki,T.,K.Mishima,K.Yoneda,S.Fujine,K.Kanda,H.Nishihara:"Visualization of Boiling Two-Phase Flow in a Small Diameter Tube Using Neutron Radiography",Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ.,vol.24,pp.76-83(1991)
- 4) Matsubayashi,M.,A.Tsuruno,Y.Horiguchi:"JRR-3 Neutron Radiography Facility", Proceedings of the Third Asian Symposium on Research Reactor,JAERI,pp.581-588 (1991)
- 5) Kanda,K.,S.Fujine,K.Yoneda:"KUR Neutron Television System",Neutron Radiography, Proceedings of the Second World Conference on Neutron Radiography,Eds. J.P. Barton,Von Der P.Hardt,Reidel,Dordrecht,Netherlands,pp.601-608(1987)
- 6) McCrory,F.M.,J.G.Kelly,D.A.Tichenor,A.A.V.Berkmoes:"Sandia National Laboratories High Flux Neutron Radiography Facility Image Characterization",Neutron Radiography (4),Proceedings of the Fourth World Conference on Neutron Radiography, Ed. J.P.Barton,Gordon & Breach Sci. Publ.,Yverdon,Switzerland,pp.423-431(1994)
- 7) Kelly,J.G.,F.M.Mccrory,P.J.Cooper:"System Design and Radiation Field Characteristics of the High Flux Neutron Radiography Facility (HFNRF) at Sandia National Laboratories",Neutron Radiography (4),Proceedings of the Fourth World Conference on Neutron Radiography,Ed. J.P.Barton,Gordon & Breach Sci. Publ.,Yverdon,Switzerland,pp.385-394(1994)
- 8) Tanaka,R.,K.Ando:"nac High Speed Camera System HSV-1000 / Ultranac",OPTRONICS, No.120,pp.73-78(1991)

Visualization of Fluid Phenomena Using a High Speed Video

Kaichiro MISHIMA, Takashi HIBIKI, Shigenori FUJINE and Kenji YONEDA

Research Reactor Institute, Kyoto University

Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-04

ABSTRACT

Experiments on visualization of fluid phenomena in a metallic vessel were conducted using a high-speed video with a steady thermal neutron beam. The Japan Research Reactor 3M, whose flux at the imaging plate is 1.5×10^8 n/cm²·s, of Japan Atomic Energy Research Institute was used as a neutron source. The imaging system for high frame-rate neutron radiography with the steady thermal neutron beam consisted of a high sensitivity scintillator, ⁶LiF/ZnS:Ag, an image intensifier whose gain was a factor of 100,000 at the maximum, and a high-speed video which could record phenomena at 1000 frames/s for 14 minutes by using an ordinary VHS tape with the recording time of 120 minutes at the normal speed. Visualization of air-water two-phase flows in a rectangular duct with 2.4 mm gap and 40 mm width were successfully performed with the steady thermal neutron beam and this imaging system at frame rates up to 1000 frames/s. The shapes and the behavior of bubbles and liquid films were clearly observed. The rising velocities of slug bubbles and the flow regimes could be also measured. It was clarified that this new technique may have significant advantages both in visualizing and measuring high-speed phenomena when the visible light is not applicable.

4.6 マウスおよびラットの In vivo 中性子ラジオグラフィ撮像

加藤 一夫 稲沢市民病院
 松本 元一 名古屋大学 名誉教授
 岩田 仁 愛知県がんセンター

近年 NMR の発達により正常組織と癌が区別できるようになり、肝臓癌における水構造は正常肝組織とは異なることがわかってきた (Era, et al., 1986)。またタンパク質の構造変化にともない水構造が変化することもわかってきた。生体内の成分の 60% 以上は水であり、中性子の水に対する cross section は非常に大きく、生体内の水構造の解析には NMRとともに中性子が有用であると考えられる。しかし生体の水の多さに対して良好な中性子源や検出器がなかったので in vivo での生体に中性子ラジオグラフィは応用されていなかった。生体内における水構造の解析の基礎として、今回生体を用いての中性子ラジオグラフィーによる撮影を試みた。

材料及び方法

雄 4 週令 ddY マウス、 BALB/C マウス及び雄 2 カ月令 F 344 ラットを SLC (静岡県実験動物農業協同組合、浜松) から購入し使用した。動物はラット標準食 CE-2 (日本クレア株式会社、東京) および水道水を自由に摂取させた。

BALB/C マウスには肺に腫瘍を発生させるため 0.2 mmol N-nitroso-morpholine (Sigma Chemical Co.) を飲料水として 20 週間投与し、投与開始後 40 週または 75 週に使用した。

中性子ラジオグラフィー

装置は、日本原子力研究所 JRR-3M 研究用原子炉の熱中性子ラジオグラフィー装置 No. 2 (東海村、茨城県) を使用した。マウス及びラットの中性子ラジオグラフィーは抱水クロラール 40 mg / 100 g 体重を腹腔内注射による麻酔下で撮影した。動物は 2 mm 厚アルミニウムのグリッド板に 1/2 インチ外科用プラスチックテープ (Transporte, 3M MEDICAL, St. Paul, MN, USA) 及び径 1 mm のアルミニウムの針金にて固定した。中性子に 20 秒または 30 秒露光し X 線用フィルムに撮影した。

ビデオ撮影には、1 画像 1/30 秒の通常の VHS ビデオテープ及び装置を使用した。

中性子ラジオグラフィー装置

日本原子力研究所 JRR-3M 研究用原子炉
 热中性子ラジオグラフィー装置 No. 2 (東海村) (Tsuruno, 1992)

Thermal Neutron Beam Intensity : 1.5×10^8 (n/cm². s)
 Cd Ratio of Gold : 130
 L/D Ratio : 176
 Size of Irradiation Field : 255 X 305 (mm)
 n/ γ Ratio : 6.25×10^6 (n/cm². mR)
 Irradiation Dose at Irradiation Field
 (Neutron) : 0.16 (Rem/s)
 (γ) : 24 (mRem/s)

結果

X線用フィルムを用いた中性子ラジオグラフィー

四肢及び尾の骨の皮質骨(Figures, 1-3)が周囲組織から明瞭に区別できた。それらの部位の軟骨及び骨髓は周囲組織と同様の中性子散乱吸収がみられたが、皮質骨との比較において明瞭に判別できた。しかし肋骨は呼吸によるブレのため、椎骨などの軸幹の骨は周囲組織の高度の中性子散乱吸収のため判別できなかった。

頸部及び縦隔の気管透亮像(Figures 2, 4, 6)と肺の透亮像(Figures 1, 2, 4, 6)が明瞭に認められた。X線撮影とは違って肋骨像が肺透亮像を妨害することはなかった。N-nitrosomorpholine投与開始後75週のマウスでは肺腫瘍が明瞭に認められた(Figure 6)。心臓(Figures 1, 2, 4, 6)は周囲の肺が透亮像として認められその結果散乱吸収像として明瞭に区別された。

腹部では胃内及び腸管のガス透亮像が認められた(Figures 1, 2)。

X線フィルムを使用したこれらの画像はスーパー アイ(浜松ホトニクス社)による微分画像でより鮮明に認められた(Figure 7)。

ビデオ撮影による中性子ラジオグラフィー

ビデオ撮影では、X線フィルム使用の画像とほぼ同様の画像が得られたが、画質はX線フィルムによるものより画質、コントラストともにやや落ちていた(Figure 8)。しかし呼吸とともに肺の拡張収縮、及び心拍とともに心臓の拡張収縮が明瞭に認められた。

考察

中性子ラジオグラフィーの臨床応用については、いくつかの研究(総説として Berger, 1965, Duehmke, 1980)があるにも関わらず、多くの技術的な問題が解決されていない。一番の問題点はいかに患者に対する被爆線量を減少させるかというところにある。中性子ラジオグラフィーを医学的研究や診断に応用するにあたっての制限は熱中性子が水素に富む厚い試料に対して相対的に小さな透過性しかないことに関連している。熱中性子散乱は厚い試料で多くなりその結果得られる像がぼける。

撮影像の質的改善は、医療分野のX線撮影で行われているように試料と検出器の間に斜角散乱放射線を吸収するような吸収グリッドを使い解像度をあげることである。Atkins(1965)がグリッドを使用してマウスの全身像の中性子ラジオグラフィーの鮮鋭度を著しく改善した。一方、熱中性子の場合より、より高エネルギーの中性子の方が生物学的試料に対して低い散乱横断面積を持つ。それ故、エピサーマル中性子を使用すればある程度、より厚みのある試料が撮影できる。しかしこの方法はある程度コントラストが犠牲になる。高速中性子と γ 線のコンタミネーションを減少することによるバックグラウンドの低下は対象に対する総線量を減少させ、また像のコントラストを改善するのに役立つ。ほとんど純粹な中性子線をつくる方法として実験的に中性子回折結晶の使用が示唆されている(Barton, 1965)。最近この方法を改善して熱分解グファイトの結晶を大きく並べて、S/Nにして約100のバックグラウンドを減少させた直径7.5 cmのほとんど純粹な中性子線が得られている。この中性子線を利用して、数分の露光でホルマリン固定した腫瘍やインプラントのある骨組織の良好な中性子ラジオグラフィーを得られている(Boyne and Whittmore, 1976)。

これらの研究から我々は純粹で強力な中性子源を使用すれば生体の中性子ラジオグラフィーが可能と考えた。現有で最も高性能であると考えられるJRR-3Mの熱中性子ラジオグラフィー装置(TNRF)を使用して生体の中性子ラジオグラフィーを試みた。ビデオ撮影、X線フィルムを使った中性子ラジオグラフィにより、in vivoでの撮像に成功した。X線フィルムを使用した撮像ではビデオ撮影に比してより明瞭な像がえられた。ビデオ撮影における解像度の悪さ及び露光時間の短さによる散乱光の影響は装置の改良により容易にX線フィルムと同様な良質な像が得られるものと期待したい。肺が呼吸により拡張収縮を繰り返しているにも関わらず30秒の露光で2-3 mmの肺腫瘍の撮像に成功したことは中性子に対する腫瘍の横断面積が周囲の肺組織に比して非常に大きいことを物語るものである。今回のような、良質な中性子源を利用した中性子ラジオグラフィーは、生体における骨、軟骨、肺の腫瘍等の病変描出可能であり、がんの中性子治療研究にとって強力な手段であるとともに腫瘍の水構造の解析に有力な手段と成り得ると考えられた。

文献

1. Atkins, H. L.; Materials Evaluation, Vol. 23, 453-458, 1965.
2. Barton, J.P.; A Comparison Between Thermal, Epithermal and Subthermal Neutrons For Radiography. Proceedings of the Symposium on Physics and Nondestructive Testing, IIT Research Institute, 1965, 110-143.
3. Berger, H.; Neutron Radiography. Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 1965.
4. Boyne, P. J. and Whittmore, W. L.; Applications of Neutron Radiography to Histopathology in "Practical Applications of Neutron Radiography and Gaging ed. by H. Berger, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 77-86, 1976.

5. Duehmke, E.; Medizinische Radiographie mit schnellen Neutronen. Verlag Karl Thiemicg, Muenchen. 1980.
6. Era, S., Kato, K., Sogami, M., et al; Biomedical Res., 7, suppl. 2, 41-46, 1986.
7. Tsuruno, A.; Abstract of the 4th WCNR at San Francisco, 1992

写真1. 中性子ラジオグラフィー全身像(照射20秒)

BALB/C マウス(44 W) N-nitrosomorpholine 投与
肺、心臓、尾の骨および軟骨の像

写真2. 中性子ラジオグラフィー上半身像(照射20秒)

BALB/C マウス(44 W) N-nitrosomorpholine 投与
上肢の皮質骨及び骨髓、気管、肺、心臓の像
肋骨像欠如

写真3. 中性子ラジオグラフィー下半身像(照射20秒)

BALB/C マウス(44 W) N-nitrosomorpholine 投与
下肢の皮質骨及び骨髓、尾の骨、骨髓及び軟骨

写真4. 中性子ラジオグラフィー胸部像(照射30秒)

BALB/C マウス(79 W) N-nitrosomorpholine 投与
右肺下肺野腫瘍像

写真5. 肺肉眼像

写真4と同一マウス

写真6. 中性子ラジオグラフィー上半身像(照射30秒)

BALB/C マウス(79 W) N-nitrosomorpholine 投与
左肺中肺野腫瘍像

写真7. 中性子ラジオグラフィー胸部像(照射30秒)

画像処理像(浜松フォトニクス社、スーパーアイ)

写真6と同一マウス

左肺中肺野腫瘍像

写真8. 中性子ラジオグラフィー胸部ビデオ像

BALB/C マウス(44 W) N-nitrosomorpholine 投与
右下肺野腫瘍像



Figure 1. The whole body image of a mouse (44 w old) treated with N-nitroso-morpholine. Clear images of the lungs, the heart and the bone and the cartilage of the tail. The exposure time 20 sec.

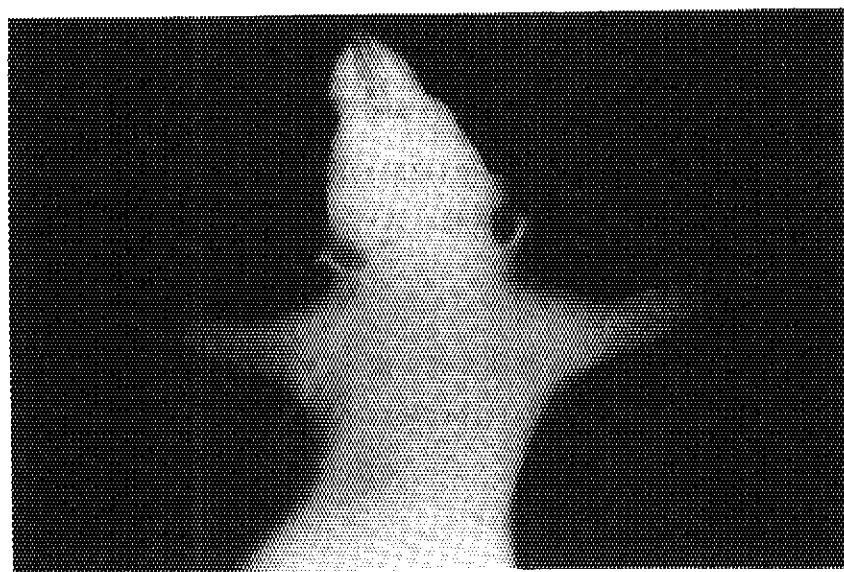


Figure 2. The upper body image of a mouse (44 w old) treated with N-nitroso-morpholine. Clear images of compact bones and bone marrows in the upper extremities, the bronchi, the lungs and the heart. No disturbance with ribs. The exposure time 20 sec.



Figure 3. The lower body image of a mouse (44 w old) treated with N-nitroso-morpholine. Clear images of compact bones, cartilages and bone marrows in the lower extremities and the tail. The exposure time 20 sec.

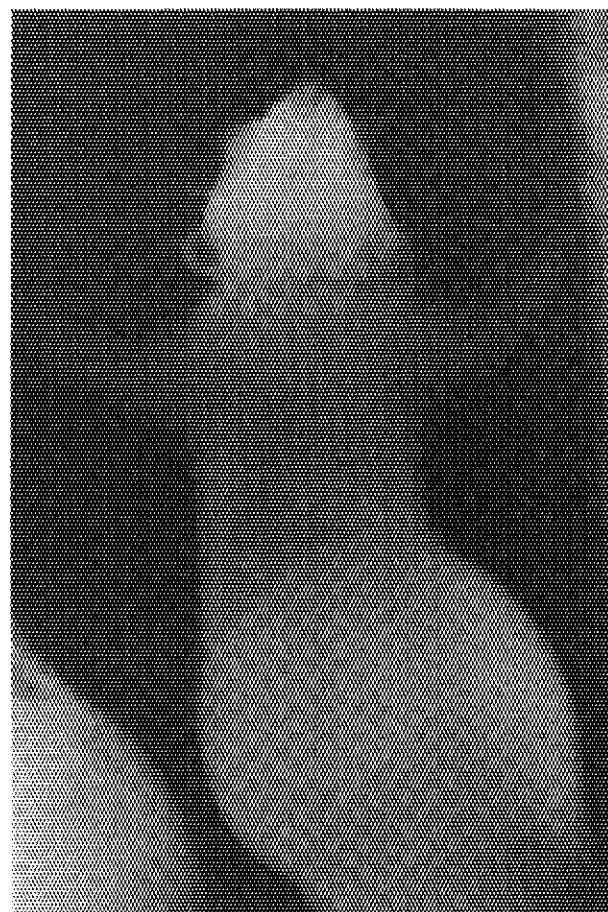


Figure 4. The upper body image of a mouse (79 w old) treated with N-nitroso-morpholine with tumors in the right lower lung. The exposure time 30 sec.

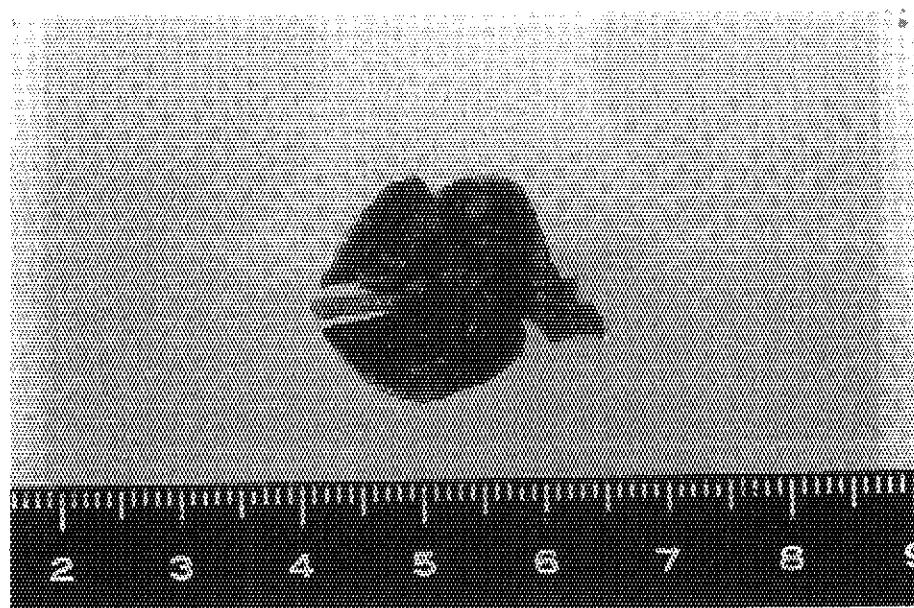


Figure 5. The lung of autopsied mouse same as in figure 4. Tumors in the right lung.



Figure 6. The upper body image of a mouse (79 w old) treated with N-nitroso-morpholine with tumors in the left lower lung. The exposure time 30 sec.

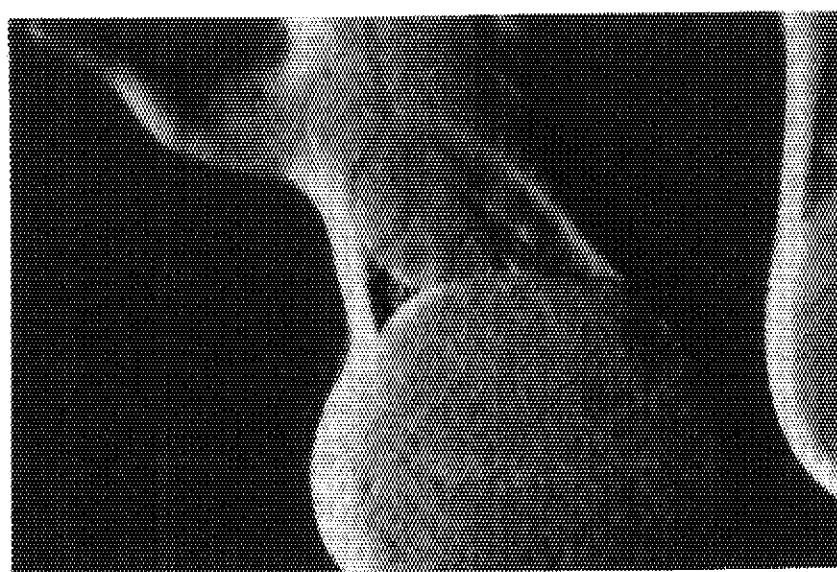


Figure 7. A differential calculated image of the upper body of the mouse (79 w old) treated with N-nitrosomorpholine. Clearer images of the bronchus, the heart and the tumors. Treatment with the Super Eye (Hamamatsu Photonics Co. Ltd., Hamamatsu, Japan) of the same X-ray film image as Figure 6.

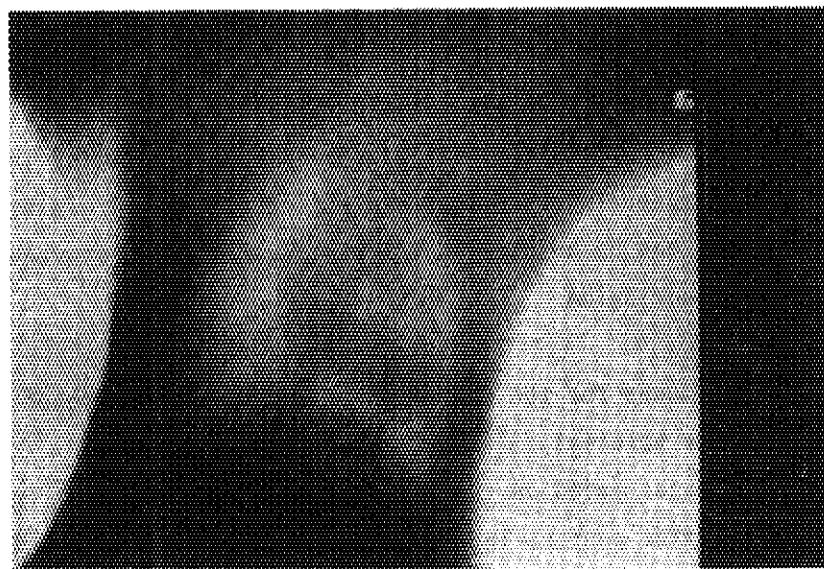


Figure 8. The video image of a mouse breast (44 w old) treated with N-nitrosomorpholine with tumor in the right lower lung.

4.7 放射性廃棄物貯蔵用多孔物質研究への中性子ラジオグラフィの応用

F. ペテルカ*

チェコ

1. Introduction

The extensive research and development on long term management of high-level radioactive waste has been carrying out in more countries. Deep geological disposal of vitrified waste is the most likely choice in this respect. The proper selection of the geological formations, which will effectively isolate the waste from the contact with the surrounding environment, is the very important. For the full scale evaluation of relevant geological formations, many tests are required. Precise examination based on not only in situ testing but model testing has been carried out too.

Neutron Transmission Analysis (NTA) can become one of the nondestructive analytical methods for the shear zone porosity and fracture flow structure in the laboratory modelling.

The extensive research in application of NTA method to the building industry dealing with the analogical problems has been carried out. NTA method seems to be the most sensitive method for the distribution of moisture and water protective agents on a laboratory scale. The neutron radiography based Standard Testing Method for Moisture Analysis (STMAM) was already introduced to the building industry in order to evaluate the properties, functions and efficiency of hydroinsulations agents.

Experience obtained can be helpful in the radioactive waste storage research in JAPAN (JAERI, PNC) and worldwide.

2. Neutron based techniques for the detection of moisture or hydrogen containing substances in porous material

Portable neutron gauges based on the weak neutron sources, like ^{241}Am -Be, enable simple measurement of water content in the porous material structure. The maximum measuring depth is 25cm, spatial resolution is not higher than 5cm and accuracy of method is reported 2%vol. of water.

Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA-Fig.1) gauging technics is proposed for the measurement of moisture profiles in the 50~100cm thick layers of porous material. This method is based on the spectroscopic detection of 2.23MeV gammas

* リサーチフェロー（利用開発室） 1993.3.～ 1994.2.

from thermal neutron captures on hydrogen. Thermal neutrons being produced in the slowing down of fast neutrons from suitable source, penetrate the material.

Prompt neutron activation techniques using a small neutron generator are in routine use for quantitative determination of chemical composition.

Thermal neutron radiography offers an effective tool for qualitative and quantitative determination of distribution of water and other hydrogenous substances in porous material.

A comparison of neutron radiography and neutron probes with common non-nuclear moisture measuring techniques is given in Table 1.

3. Neutron radiography and Neutron Transmission Analysis application to detection of moisture and hydroinsulation substances in porous material

The principal factor for hydroinsulation treatment quality evaluation is the efficiency of the water protective agents in preventing the penetration of water by capillary action or pressure gradients. Parameters important in measuring this efficiency are easily determined using the STMAM and include the profile and speed of movement of the penetration front, and the concentration (relative hydrogen content density) profile inside the penetration front of either the water protective agents or water itself.

The principle of the STMAM can be illustrated by the following example. A porous building material of known dimensions is treated with the liquid protective agent. The quality of impregnation is determined by a water penetration test. Neutron radiographs of the sample are made at selected intervals during the test. The method is the same if water penetration is being evaluated, without the water protective agents treatment. Water or water protective agent can easily be distinguished in the matrix of the porous (building) materials, since thermal neutron attenuation coefficients of water or water protective agent are 10 to 100 times higher than those comprising the porous matrix, namely Ca, Si, Al, O.

If the quantitative neutron radiography task is to obtain an optical mapping of the degree of attenuation of the incident beam, NTA method is using the specific experimental arrangement for it.

Optical density on radiographic images or luminance from radioscopy (electronic radiograph) images are analyzed.

NTA method was used for the extensive 2 dimensional study of the water distribution in the matrix of porous material under different conditions in order to prove or improve experimentally the theoretical data.

With this method using research reactor as the strong neutron source (like $1.12 \times 10^7 n cm^{-2} s^{-1}$, L/D=360) and film detector (like Gd/fine grain film), the spatial

resolution <0.5mm can be achieved. The water content in the porous material sample in the range 1~30%vol H₂O with 5% measurement accuracy can be determined.

4. Conclusion

Neutron radiography and NTA application to porosity study was mainly dealing with the building industry, the art protection and the basic research. Cooperation with the building industry has produced the solution of number of problems. Cement hydratation, concrete material, red brick sample, roofing tiles protection and epoxy resin efficiency for sand stones sculpture protection, can be cited as example.

Many valuable experiences (like samples thickness, penetrating substances, detection techniques for the different experiments) were achieved. These can be used in the rockies formation studies too.

Resolution is the proposal to JAERI and PNC for the cooperation, which can even be on the international basis.

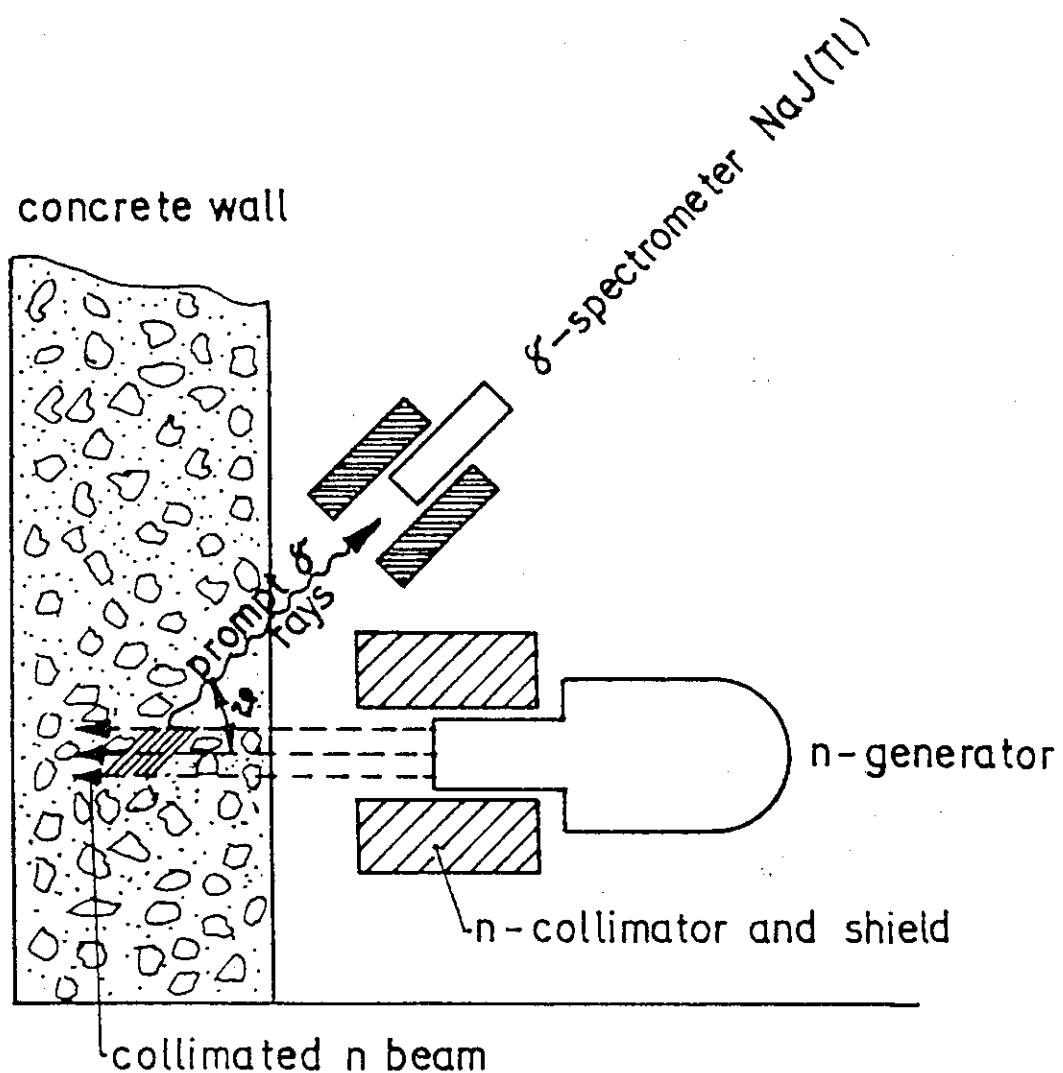


Fig.1 Prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA)

Table 1 Comparison of neutron and some important non-neutron measurement techniques for the detection of moisture in building materials and structures

Method (type)	Characteristics	Status	Econ. cost (DEM)
Neutron probe (subsurface - 20cm)	Routine field use, relative method, Sensitive for hydrogeneous mater. (asphalt)	standard	$\approx 10^4$
Neutron radiography (in bulk)	Detects hydrogen and struct.mat. Laboratory method, field use feasible Quantitative (1-30% vol H ₂ O) - NTA	standard	$2 \times 10^5 - 10^6$
NMR (in bulk)	Less destructive (samples), quantitative Lab. method, detec. of free and crystal water	in develop.	$> 10^5$
Gamma ray CT (in bulk)	Laboratory, quantitative method, Detection also of defects, structural details	in develop.	$> 10^5$
Microwaves-Transm. (in bulk)	Less destructive (bore holes), sensitive qualitative labor.method (1% H ₂ O)	in develop.	$\approx 10^5$
Microwaves-Reflection (subsurface - few cm)	Sensitive qualitative (relative) Field use feasible	in develop.	$2-5 \times 10^5$
Capacity meters (subsurface - few cm)	In field, qualitative (relative)	standard	$\approx 10^3$
Resistivity meter (surface)	Less destructive (bore hole), in field qualitative method	standard	$\approx 10^3$
Infrared reflectoscopy (surface)	Qualitative, relative, method in field use feasible	in develop.	$10^5 - 5 \times 10^5$

4.8 中性子ラジオグラフィの植物研究への応用

東京大学農学部

中西友子

概要

中性子ラジオグラフィを用いて、土壤中の根の像を中心に実験を進めた。また、その他の植物試料についての同法の応用の可能性についても検討した。根の像については、植物試料としてダイズを用い、アルミニウムの薄箱中で育成をしながら、経時的に根および土壤中の水分動態をX線フィルム上の像として得ることができた。画像解析はまだ進行中であるが、種々の条件下での根の像が得られ始めている。土壤に吸水性ポリマー（ポリビニルアルコール系ポリマーおよびパルプ由来のポリマー）を添加して植物を育成したところ、ポリビニルアルコール系ポリマーの場合には、ポリマーが添加された側のみ、また、パルプ由来のポリマーを添加した場合にはポリマーが添加されていない側のみ2次根の発達が見られた。パルプ由来のポリマーは、針葉樹パルプ粉体をカルボキシメチル化することにより得られたものであるが、根が育成する直下に添加した場合には根は土壤の浅いところでのみ生育したが、植物の育成状況および乾燥重量はコントロール植物と同等であった。よって、パルプ由来のポリマーにより根の形状をデザインする可能性が示唆された。樹木では、ヒノキの輪切り切片の像から樹木中の水分が必ずしも年輪に沿っていないことが示された。

1. はじめに

植物体自身の研究、それは如何に進めることができるのだろうか。今までの死んだ物の科学ではなく、生きたものの科学を行うためには、非破壊の実験系の開発が必要である。X線やCT、NMRを活用すれば生体を生きたまま測定することが可能である。しかし、これらの手法はまだ分解能が低く、cmオーダーの結果しか得られない。現在、植物体を生きたままで高分解能で測定することが可能な手法は、中性子ラジオグラフィ（NRG）のみと言っても過言ではない。日本原子力研究所で幸いにも昨年度から、協力研究として本研究が認められたので、いくつかの植物体の像が得られ始めている。

NRGの植物研究への応用は、国内では原子力研究所を除いて皆無であり、国外でも数年前に根の長さを測定する目的で応用された報告があるのみである。NRGを用いて植物体のみならず、土壤水分の動態を調べている例は無い。土壤水分動態については、植物育成上重要なファクターであるにもかかわらず、

今まで実際に実験を行うことが困難であることからほとんどデータ蓄積がない。また、生きた根そのものも実際に見ることが困難であるため、ブラックボックスとなっている。

植物体のN R Gでは、植物の約80%を水分が占めることから、植物組織そのものの像が得られる。通常見ることができない葉、茎、実および花などの内部組織像である。本手法は植物研究においてはまだ未開拓の分野であるため、どのような応用が可能かも含めて実験を行った。

2. 実験方法

① ダイズ試料

ダイズを発根させた後、根の長さが3-5 cmに育成した時点で、テフロンシートを内側に貼ったアルミニウム薄箱中に移し替えてさらに育成させた(25°C, 20,000 lux)。育成中、経時的に植物試料を植物育成チェインバーから取り出し、原子力研究所に運び中性子の照射を行った。

吸水性ポリマーは、ポリビニルアルコール系ポリマーとパルプ由来のポリマーを用いた。ポリビニルアルコール系ポリマーは、乾燥重量で土壌の3%を添加した。充分蒸留水で膨潤させた後、15%の水分を含む豊浦の標準砂の上部1箇所に添加した。パルプ由来のポリマーは、針葉樹パルプ粉をカルボキシメチル化することにより得られた。ポリビニルアルコール系ポリマーと同様に、薄箱上部1箇所に添加した。

J R R - 3 M 中性子ラジオグラフィ照射チェインバー中では、X線フィルムとガドリニウムコンバータを内蔵したカセットに試料を固定した。各試料、J R R - 3 M での照射時間は19秒であり、総熱中性子束は、 $3 \times 10^3 n/cm^2$ であった。照射後、X線フィルムを現像し、透過型スキャナーで画像を読み取り、コンピュータ処理を行った。

② 樹木試料

ヒノキ、アカシア、クロマツ、メタセコイアおよびコナラの5種類の樹木を照射日の朝、農学部演習林から切り出し、原子力研究所へ運び込んだ。照射直前に各樹木を1、2および3 cmの厚さのスライス状に切り出した。カセットにこれらのスライス試料を固定し、ダイズの場合と同様に照射を行った。

3. 実験結果および考察

① ダイズ試料

F i g . 1 にコントロール試料のN R G像を示す。F i g . 1 (a) は、アルミニウム薄箱中で5日間、(b) は12日間育成させた時点の像である。図中、6箇所の切断線における像の黒化度をグラフにプロットした図が各々の図の内

側に示されている。グラフ上、上向きのピーク(↑)は根を表している。根近傍の下向きのピークは根による水分の吸収を示している。図から、最も水分吸収量が多い場所は、根の上部であり、しかも水の吸収は左右非対称であることがわかる。現在、根に沿って根から1mm以内の地点での水分動態を求めている最中である。

経時的に撮った像を比較する際の問題点は、①各フィルムの現像ムラ、②カセットの位置による黒化度の変化(多分、現像によるものと予想される)、③X線フィルムのdynamic rangeがlinearでなく、かつ比較的狭いこと、④試料を毎回原子炉内に持ち運ぶため土壤中にヒビなどが入りやすく、土壤の形態が変化しやすいこと、⑤植物育成箱は土壤中の水分変化を見やすい大きさであること、などが挙げられる。これらの問題点を検討していく予定である。

Fig. 2 (a) にパルプ由来のポリマーを添加した場合のNRG像を、(b) にポリビニルアルコール系ポリマーを添加した場合のNRG像を示す。何れも、植物試料を薄箱中で6日間育成させた場合の像である。図に示されるように、ポリビニルアルコール系ポリマーを添加した場合には、2次根は吸水性ポリマー側のみしか生育しない。一方、パルプ由来のポリマーを添加した場合には、反対側のみに2次根の発達が見られる。パルプ由来のポリマーを根の真下に添加した場合には、乾燥重量など植物の育成には変化は見られず、根が土壤の浅い位置でのみ発達した(データ省略)。このことから、パルプ由来のポリマーを用いることにより、根のデザインが可能であることが示唆された。

②樹木試料

5種類の樹木試料の代表例として、暑さ1cmのヒノキの切片のNRG像をFig. 3に示した。Fig. 3 (a) は、得られたヒノキのNRG像、(b) は、(a)の黒化度を縦軸にとって像を立体化させた図である。図に示されるように、水分分布は樹木の外側に偏り、さらに必ずしも年輪に沿っていないことがわかる。樹木の心材化が起こる場合には心材が年輪に沿わないことが知られており、原因は不明であるが、水分分布の偏りが原因解明の糸口を与えることを期待したい。

4. おわりに

以上、今まで得られている結果を報告した。NRGでは、植物育成土壤も育成ポットを薄くすることにより、土壤中の水分動態を根の生育に併せて像として得ることができることが示された。NRGの植物研究への応用はほとんど行われていないため、あらゆる面で手探りの状態である。また、植物は育成に時間がかかるため、何週間もかけて育成し連続的に像を撮ってもまたやり直しの場合もあり、他の研究分野と比較すると進展が遅いという難点がある。しかし、上述したように、生きた植物体をそのまで測定できるNRGの植物研究への応用は新しい分野を切り開くと予想されるため、引き続き次年度も行ってい

きたい。

5. 関連報告文献

- 1) T. M. Nakanishi et al. Radioisotopes, 40(3) 126 (1991)
- 2) T. M. Nakanishi et al. ibid, 40(5) 182 (1991)
- 3) T. M. Nakanishi et al. ibid, 41(12) 638 (1992)
- 4) T. M. Nakanishi et al. Neutron Radiography(4) J. P. Barton ed. 57 (1992)
- 5) T. M. Nakanishi et al. Radioisotopes, 42(1) 16 (1993)
- 6) T. M. Nakanishi et al. ibid, 43(8) 451 (1994).

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、原子炉利用時間の調整、並びに数々の御指導をいただいた、研究炉部の小平恒夫室長、鶴野晃氏、松林政仁氏、および安藤氏に心から謝意を表したい。

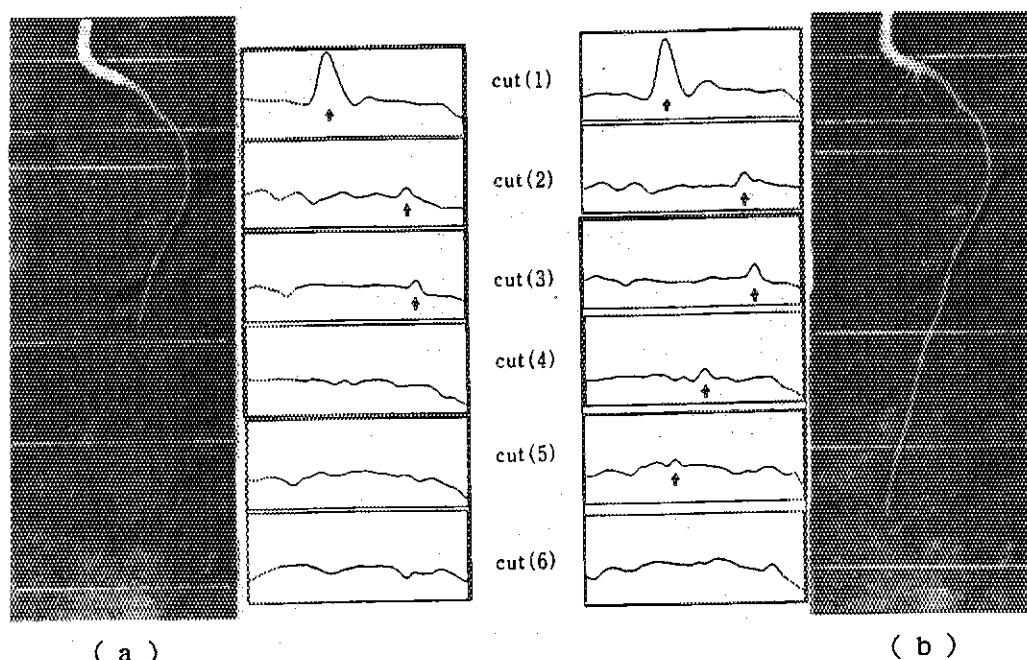
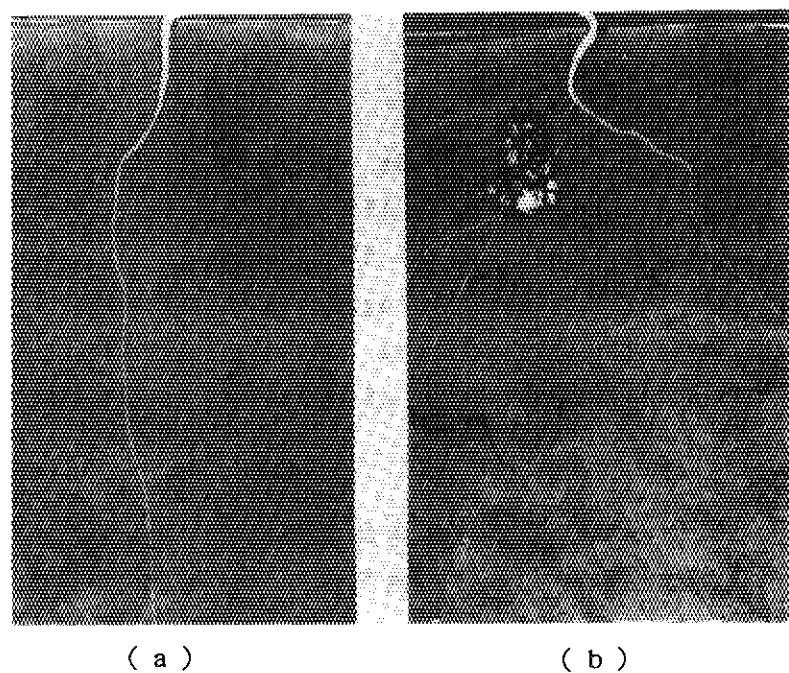


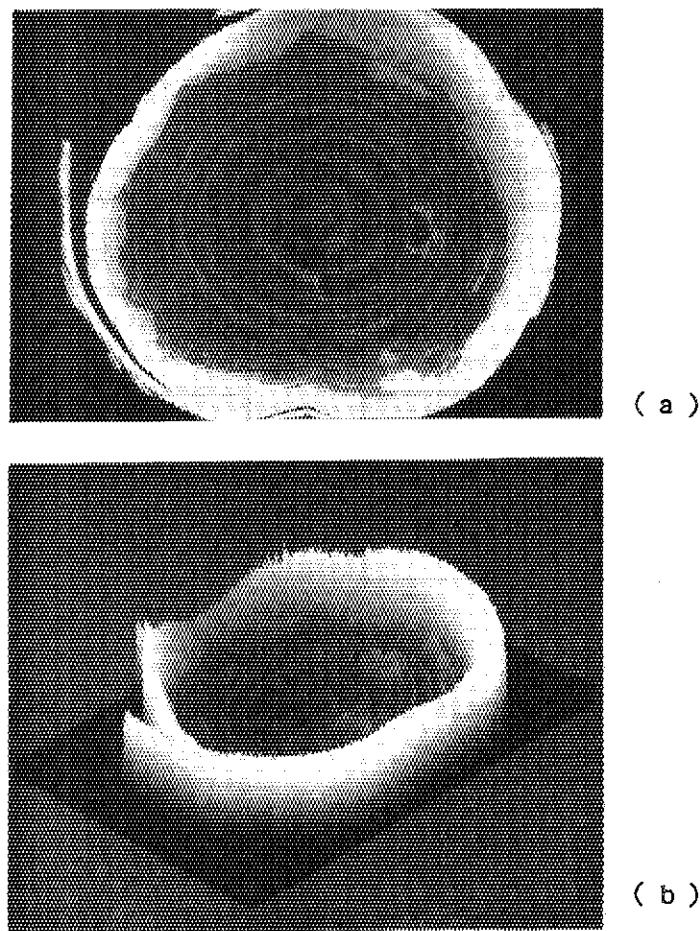
Fig. 1 Image of Soybean and Densitometry



(a)

(b)

Fig. 2 Image of Soybean when water absorbing polymer was added



(a)

(b)

Fig. 3 Image of Japanese Cypress

4.9 農林水産研究における中性子ラジオグラフィの利用

宮本 進
農林水産省畜産試験場

1. はじめに

中性子ラジオグラフィは、中性子を利用した非破壊検査法で、試料を通過した中性子は、試料内部の物質の状態を反映し、フィルム上に濃淡画像として、捉えられる。従来、用いられてきたX線では不十分であった生体（作物、家畜、海產物質）試料中の軟組織の画像解析、代謝研究への応用等が期待される。

農林水産省の研究機関による、本法を利用した研究は、これから段階であり、その最初の試みとして、原研東海研究所の協力を得て、作物、家畜の組織等畜産関係試料について本法を適用し、これらの試料の中性子ラジオグラフィによる画像の作成を行ったので報告する。

2. 材料および方法

（1）材料

家畜試料・・・当場で飼育した成豚（体重105kg）から得られた耳（約16cm×16cm）、
皮膚の一部（背部、12cm×22cm）、肢の一部（約7cm×18cm）、
尾（約5cm×30cm）
作物試料・・・当場の飼料作物圃場より採取した、飼料用とうもろこしの穀実（XL61、
乳熟期、約5.5cm×25cm）と葉、イネ科野草（いねびえ、出穂期）、
くずの茎葉

（2）方法

上記試料を原研東海研究所のJRR-3M中性子ラジオグラフィ装置（熱中性子ラジオグラフィ装置第2撮影室（TNRF2））を使用し、直接法によりX線フィルム画像を得た。

3. 結果

家畜試料の画像から、豚の耳、皮膚については、全体の輪郭に加えて試料の表面の状態、特に被毛のはえ方、密度がよく表現されていた。肢の一部、尾については、厚みが大であるため(2~7cm)、細部の観察は困難であったが、被毛はよく表現されていた。(Fig.1)

作物試料については、とうもろこしの穀実は収穫前のもので表面は薄皮でおおわれているが、内部の状態が、画像によりかなりよく観察することができた。葉については細部まで表現されていた。(Fig.2)

いぬびえについては、茎、葉、穂の部分いづれも細部まで表現され、出穂前で穂が葉にくるまれている状態も観察できた。くずの茎等も細部まで観察ができた。(Fig.3)

4. 今後の課題

今回は、畜産関係試料を用いて予備的検討を行い、若干の知見を得ることができた。ここでは、中性子ラジオグラフィの農林・水産試料への利用可能な事項について、考えていることを述べたい。

(1) 家畜関係

①家畜試料の形態観察

今回、得られた知見を参考にして、いろいろな試料－鶏、ラット、豚等の骨、肝臓、腎臓等の臓器、鶏の羽毛、羊毛等の被毛、その他－を用いて中性子ラジオグラフィにより、何が見えてくるかを重点に検討。

②家畜における代謝関連物質の動態解明

第1段階では、ラット、鶏、豚等の組織標本および全身標本を用いて分布を調べ、第2段階では、比較的小型の動物(ラット、ウズラ、鶏、ハムスター、子豚等)を用い、生きている状態下での動態解明を試みる。複数の胃を持つ動物(ハムスター、羊、山羊、牛等)は、胃内のガスの発生状態が、重要意味を持っており、このガスの動きが、経時的にとらえられると興味深い知見が得られる。

(2) 作物関係

家畜の飼料、特に牛、羊等々は、2種類の飼料－粗飼料…牧乾草等、繊維含量の多いもの、濃厚飼料…穀実が主で高カロリー－が必要である。粗飼料は特に重要で、全体の飼料の一定割合を給与する必要がある。

①土壤中の養水分動態の解明

牧草は、主にイネ科と豆科の物に分けられるが、いずれも養水分の動態は重要である。

②作物および根の発育観察

牧草の根の主要部分は約10cmの深さまでに存在するが、品種栽培時期等により根の発育状況は異なっている。これらのこととを、解明するために、中性子ラジオグラフィを利用することにより、非常に有益な知見が得られる。

③作物における栄養素の吸収動態の解明

中性子ラジオグラフィの特徴を生かし栄養素（ほう素等）の吸収動態を調べる。

（3）水産関係

①魚・海草、プランクトン等の形態観察

魚（平たいもの）・海草等は厚みが薄いので、中性子ラジオグラフィによる観察が容易であると思われる。プランクトンは、微細なので、解像度のよい状態が必要である。

②魚・海草、プランクトンにおける栄養素（微量元素）の動態解明

謝 辞

今回の実験により、御協力いただきました研究炉技術開発室の鶴野晃氏および松林政仁氏に深く感謝します。

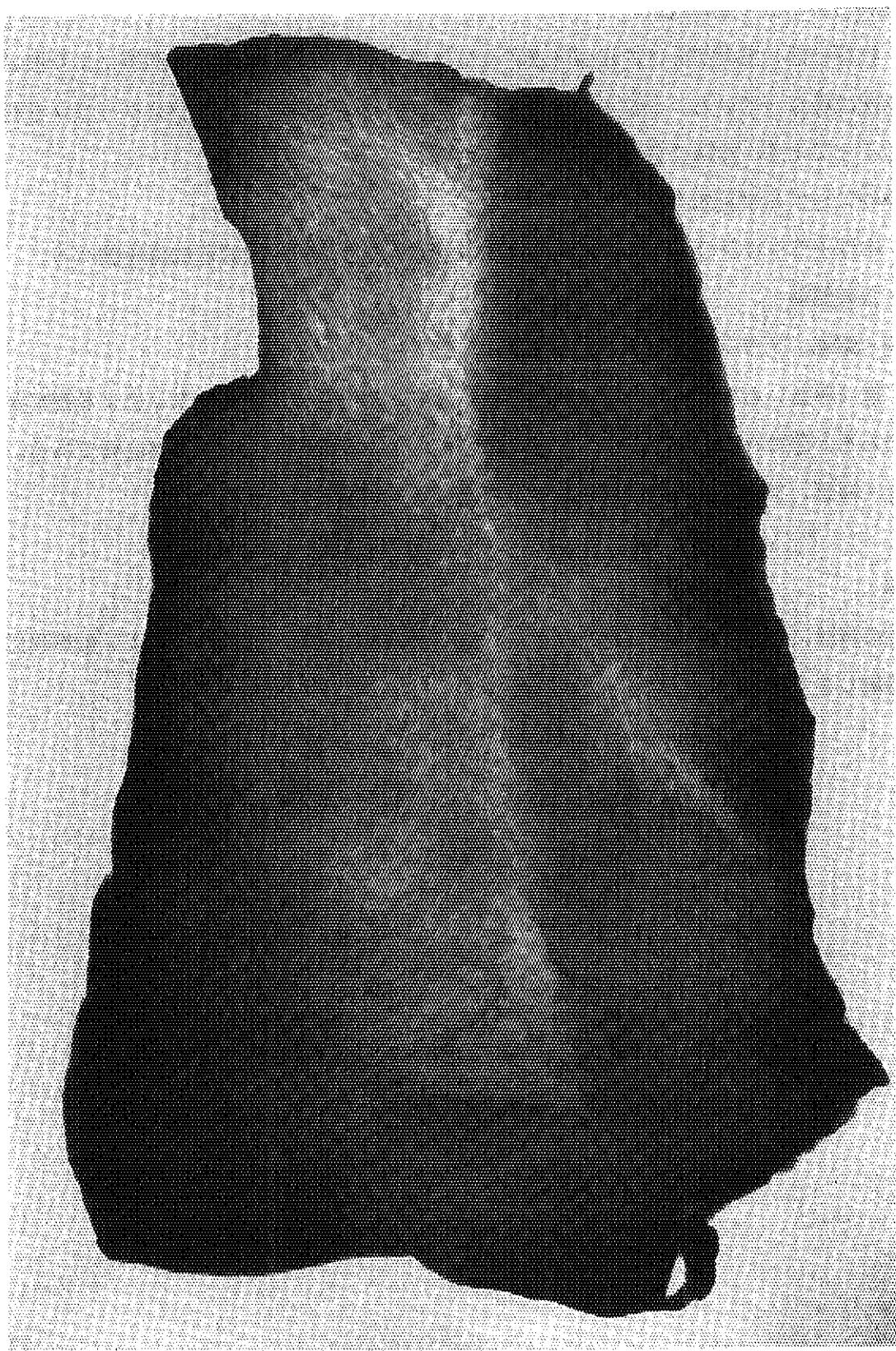


Fig.1 Neutron radiography image of skin (pig)

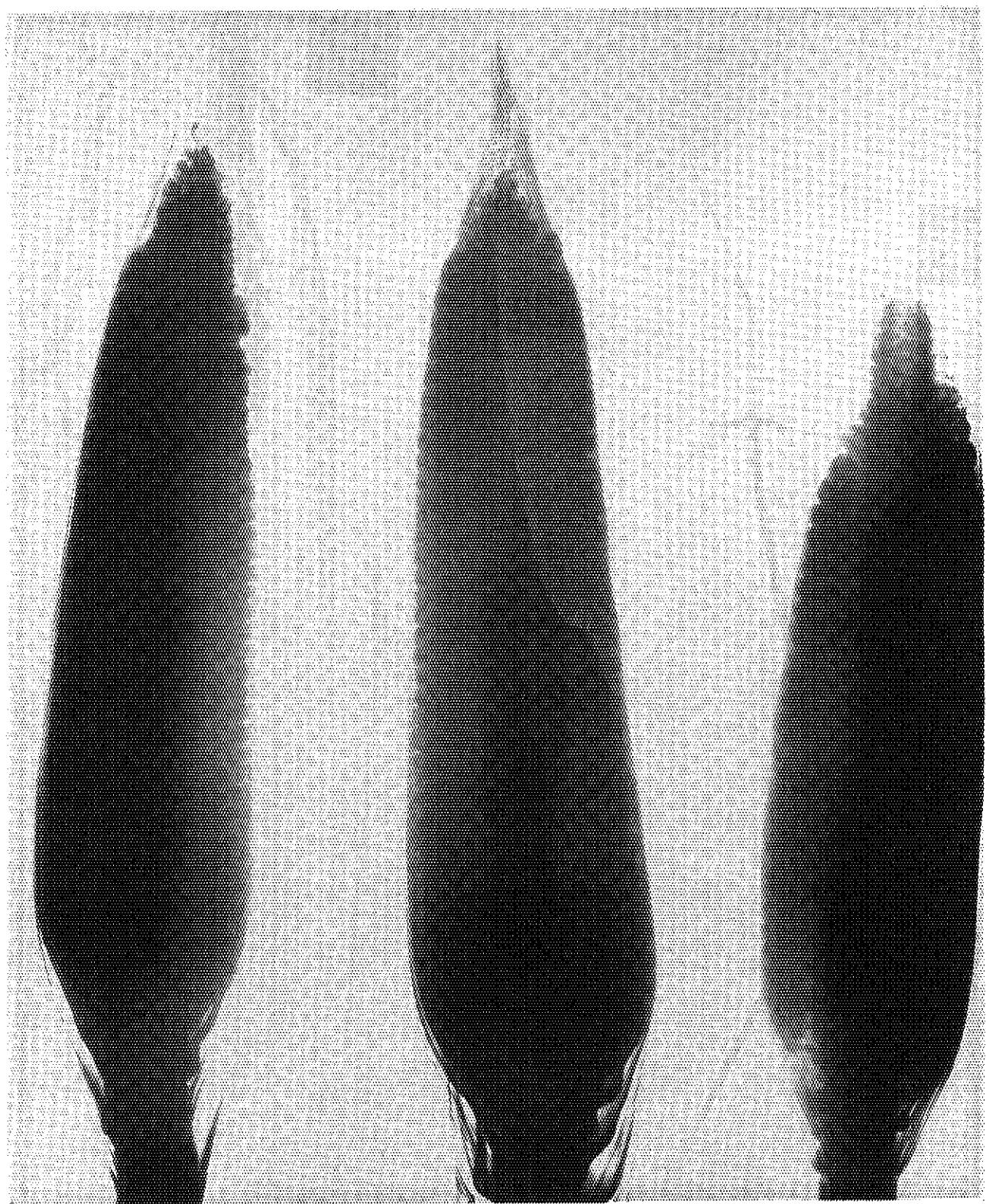


Fig.2 Neutron radiography image of corn

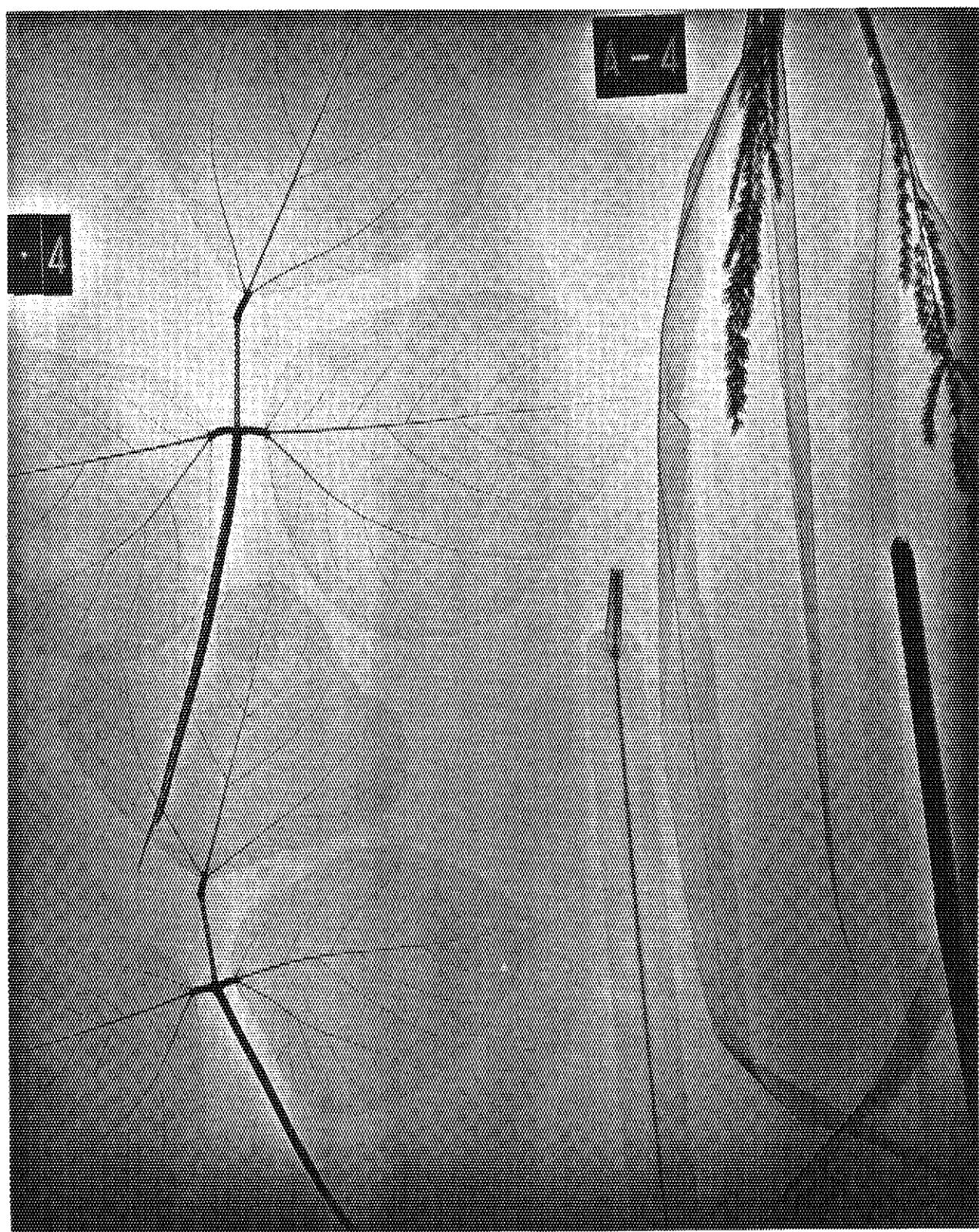


Fig.3 Neutron radiography image of grass and arrowroot

5. 閉会挨拶

古平 恒夫（原研・研究炉技術開発室）

平成5年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会の終わりにあたり、一言ご挨拶申し上げます。今回の研究会におきましては、従来の二相流関連の研究に加えまして、原研内から新規の参加があり、所外からは文化財、動植物、農林水産関係の発表がありました。松本先生のお説によりますと、中性子ラジオグラフィの研究は現在いくぶんシューリング気味であるとのことでございますが、このJRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会に関しましては、小林先生の云われますように、内容が深まり、研究対象も広まってきたのではないかと思います。

原研といたましても、今後ともよりよい研究の場を提供したいものと考えております。具体的には、皆様方と討論する場としてのこの研究会を続けていくことが重要であり、平成6年度も開催できるよう努力しております。また、装置の維持管理に関連して、ベースとなる技術開発・高度化研究も私たちの責任の一端であります。これにつきましては、松林研究員が昨年10月、1年間の留学を終えて帰国いたしましたので、多くの面で進展があるものと期待しております。将来のことにつきましては、まず、研究炉利用システムに関する新しい動きがあります。これはハード、ソフトの両面がございますが、いずれにいたしましても皆様方によりよく原研の施設を利用していただき、大いに成果を挙げていただくためには、どうしたらよいかを考えるものであります。さらに、さきほど話が出ましたJRR-5についてですが、JRR-3Mと云えども5年を経ており、新しい研究炉がすでに研究の対象になっておりまして、具体的な概念を構築し始めております。そこに取り付ける中性子ラジオグラフィ装置はどうあるべきかのご意見をお聞かせいただければ、設計に反映できるものと考えます。その意味では、この研究会は意見をまとめると適切な場であります。

最後に、今回の研究会におきましてご発表いただきましたものを成果として残す、それがこの研究会の隆盛につながるものと考えております。JAERI-Mレポートとして出版いたしますので、よろしくご協力いただきますようお願いいたします。

2日間にわたる長い時間での研究会に最後までご出席いただき、ありがとうございました。

6. あとがき

初年度から始めたJRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会も3回目の平成5年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会が無事終了し、間もなく平成6年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会が開かれようとしています。なんとかそれまでに報文集を出したいと思っていましたが、間に合いませんでした。きびしく督促しなかった担当者の怠慢であると反省しています。

研究会は発表件数、参加者ともに増加の一途ですが、今回は特に、内容の多様化に驚きました。参加者も新しいメンバーが加わり、討論にも幅が広がったように思われます。担当者としては嬉しいかぎりです。

発表者の皆様には、多忙のなか論文の執筆にご協力いただき、ありがとうございました。

担当者 鶴野 晃、松林 政仁 (1995.2.2.記)

付録 1
平成 5 年度利用状況

年／月 サイクル

初日
週

TNRF

週

CNRF

93/4			
	5	① 10	研究炉技術開発室 研究炉技術開発室 立大原研、東大農学部 研究炉技術開発室
6	14	②	京大原子炉、東大農学部 神戸大工学部 東大農学部、炉修JICA 東大農学部、炉修一般
	7		
8	16	③	名大工学部 武工大工学部 神戸大工学部、稻沢病院 研究炉利用課
	9	20	武工大工学部 武工大工学部 武工大工学部、京大原子炉、f13 武工大工学部、神戸大、山口大
10	25	⑤	伝熱流動研、東大農学部 原子炉停止 原子炉停止 伝熱流動研
	11	29	名大工学部、国立文化財研 名大工学部 京大原子炉、東大、文化財研 伝熱流動研、先端基礎研究センター、東大
94/1	2		
3	21	⑦	研究炉利用課 名大工学部、東大農学部 名大工学部 研究炉技術開発室

付録 2

平成5年度JRR-3M中性子ラジオグラフィ研究会プログラム

日時 平成6年2月3日(木) 10時~17時30分

2月4日(金) 9時30分~15時

場所 日本原子力研究所 東海研究所 研究炉実験管理棟2階 大会議室

プログラム(発表者)

2月3日(木)

10:00~10:20 主催者挨拶 日本原子力研究所 東海研究所
 研究炉部長 白井 英次
 東大・原総センター
 全国共同利用部門主任 伊藤 泰男

(座長) 小林 久夫

10:20~10:50 ミシガン大学における中性子ラジオグラフィの研究
 研究炉技術開発室 松林 政仁
 10:50~11:10 中性子ラジオグラフィによる二相流中の液膜測定
 伝熱流動研究室 大久保 努
 11:10~11:40 中性子イメージング・プレートとその中性子ラジオグラフィへの応用
 先端基礎研究センター 新村 信雄
 11:40~12:00 中性子ラジオグラフィによる加圧流動層内気泡成長の可視化観察
 山口大学工学部 加藤 泰生

(座長) 竹中 信幸

13:10~13:30 中性子ラジオグラフィの文化財への応用
 東京国立文化財研究所 青木 繁夫
 13:30~14:00 マウスおよびラットのIn vivo中性子ラジオグラフィ撮像
 稲沢市民病院 加藤 一夫
 14:00~14:30 高束熱・冷中性子を用いた高性能ラジオグラフィ技術の基礎研究
 名古屋大学工学部 玉置 昌義
 14:30~15:00 冷中性子ビームによるラジオグラフィの基礎研究
 名古屋大学工学部 小田 将広

(座長) 玉置 昌義

15:30~16:00 実時間画像歪み補正法の開発
 武蔵工業大学工学部 持木 幸一

- 16:00～16:30 植物研究への中性子ラジオグラフィの応用
東京大学農学部 中西 友子
- 16:30～17:00 高速度ビデオを用いた高速流体现象の可視化
京都大学原子炉実験所 日引 俊
- 17:00～17:30 農林水産研究における中性子ラジオグラフィの利用
農林水産省畜産試験場 宮本 進
- 17:30～18:15 平成6年度マシンタイムの調整について

2月4日(金)

(座長) 持木 幸一

- 9:30～10:00 热流動現象の可視化と計測
神戸大学工学部 竹中 信幸
- 10:00～10:30 中性子ラジオグラフィによる宇宙用排熱システムの伝熱筒内の可視化
神戸商船大学商船学部 中沢 武
- 10:30～11:00 Radioactive waste storage rock porosity study using NR
チェコ Frantisek Peterka
- 11:00～11:30 医療照射用同時モニターの方向依存性に関する実験
研究炉利用課 横尾 健司
- 11:30～12:00 (招待講演)
立教大学原子力研究所における中性子ラジオグラフィの研究
立教大学原子力研究所 小林 久夫

(座長) 松本 元一

- 13:00～13:30 平成5年度利用状況および装置整備について
研究炉技術開発室 鶴野 晃
- 13:30～14:30 総合討論
- 14:30～14:50 まとめ 研究者代表 松本 元一
小林 久夫
- 14:50～15:00 閉会挨拶 研究炉技術開発室長 古平 恒夫

付録 3

研究会出席者名簿（敬称略、順不同）

白井 英次	原研 研究炉部
伊藤 泰男	東京大学 原総センター
古平 恒夫	原研 研究炉技術開発室
日引 俊	京都大学 原子炉実験所
大久保 努	原研 伝熱流動研究室
新村 信雄	原研 先端基礎研究センター
唐澤 裕子	原研 先端基礎研究センター
堀口 洋二	原研 JRR-3 管理課
中澤 武	神戸商船大学 商船学部
有金 賢次	原研 JRR-2 管理課
大竹 政男	原研 JRR-2 管理課
木村 康哲	神戸大学 大学院
中村 泰博	神戸大学 大学院
竹中 信幸	神戸大学 工学部
根本 傳次郎	原研 JRR-3 管理課
角田 準作	放射線照射振興協会
松島 秀夫	放射線照射振興協会
青木 繁夫	東京国立文化財研究所
岩本 克昌	埼玉県立埋蔵文化財センター
犬竹 和	東京国立文化財研究所
持木 幸一	武藏工業大学 工学部
山田 穀	原研 JRR-4 管理課
黒澤 正義	原研 燃料サイクル安全評価研究室
神永 雅紀	原研 研究炉技術開発室
富沢 威	慶應大学
米沢 仲四郎	原研 分析センター
中西 友子	東京大学 農学部
横尾 健司	原研 研究炉利用課
小林 久夫	立教大学 原子力研究所
林 農	鳥取大学 農学部
加藤 一夫	稻沢市民病院
小田 将広	名古屋大学 大学院
松本 元一	名古屋大学名誉教授
加藤 泰生	山口大学 工学部
宮本 進	農林省 畜産試験場

吉井 康司	東京大学 工学部
玉置 昌義	名古屋大学 工学部
Frantisek Peterka	チエコ(原研 利用開発室)
山野 宏	神戸大学 大学院
渡辺 博典	原研 炉工学施設管理室
曾山 和彦	原研 研究炉技術開発室
村岡 進	原研 人工バリア研究室
石川 勇	原研 利用開発室
鶴野 晃	原研 研究炉技術開発室
松林 政仁	原研 研究炉技術開発室
安藤 均	放射線照射振興協会