

JAERI-Research

JP0450447

2003-032



高空間分解能中性子ズーミング管検出器の特性

2004年3月

曾山 和彦・松林 政仁・正岡 聖
中村 龍也・松村 達也*・木下 勝之*

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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

高空間分解能中性子ズーミング管検出器の特性

日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター

曾山 和彦・松林 政仁・正岡 聖・中村 龍也・松村 達也*・木下 勝之*

(2003年11月7日受理)

マイクロメートル領域の中性子イメージングを実現するため、電子線ズーミング管を応用した高空間分解能二次元中性子検出器の開発を行った。当該検出器は、光電面、電磁収束拡大電子レンズ、CCD 撮像素子から構成され、光電面は、中性子による像を得るため、Gd 薄膜を CsI 薄膜と組合させて使用した。システム空間分解能に関する実験の結果、 $25 \mu\text{m}$ の空間分解能が得られた。この空間分解能は、観察試料と光電面 (Gd 薄膜–CsI 薄膜) の距離に依存し、この距離を短くすることで更なる高空間分解能化が図られることが分かった。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*浜松ホトニクス㈱

Neutron Zooming Detector Using Electronic Zooming TV Readout System

Kazuhiko SOYAMA, Masahito MATSUBAYASHI, Sei MASAOKA, Tatsuya NAKAMURA,
Tatsuya MATSUMURA* and Katsuyuki KINOSHITA*

Neutron Science Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 7, 2003)

The neutron zooming tube has been developed using electronic zooming TV readout system for an X-ray microscope. This system consists of the photocathode, the electro-magnetic coil assembly and the CCD TV camera etc.. The photocathode consists of transmission type CsI layer in combination with neutron converters such as Gd foil. The system position sensitive resolution of $25 \mu\text{m}$ has been obtained using neutron converter. We have found that it is determined from the distance between the CsI layer and the neutron converter, then the limiting resolution could be improved.

Keywords : Neutron, Zooming Tube, X-ray Microscope, Imaging, Detector

*Hamamatsu Photonics K. K., Electron Tube Division

目 次

1 はじめに	1
2 X線ズーミング管	1
3 中性子コンバータ	2
4 実験	3
4.1 ズーミング管の概要	3
4.2 中性子-電子変換面	3
4.3 中性子実験装置	4
4.4 実験結果	4
5 結 論	8
謝 辞	9
参考文献	9

Contents

1 Introduction	1
2 Electronic Zooming TV Readout System for an X-ray Microscope	1
3 Neutron Converter	2
4 Experimental	3
4.1 Outline of Zooming TV Readout System	3
4.2 Photocathode	3
4.3 Instruments	4
4.4 Experimental Results	4
5 Conclusions	8
Acknowledgement	9
References	9

This is a blank page.

1. はじめに

イオンビーム等の利用では、近年、細胞核などへのイオン照射による DNA 損傷の生成回復過程の解析など、マイクロビームの応用が実現され始めている。しかし、中性子は、電荷を持たず、スピン 1/2 を持ち、軽元素に敏感で、物質研究のためのユニークなツールでありながらも、1) 中性子源強度がイオンビーム等に比べて数桁も弱いこと、2) マイクロメートル領域の分解能をもつ検出器が開発されていないことなどから、未だマイクロビームによる研究開発が実現されていない。しかし、現在東海村に建設されている大強度陽子加速器施設では、従来の 100 倍以上のパルス中性子が利用可能となる予定であり、中性子マイクロビーム利用の機運が次第に高まっている。

近年、集積化が進む半導体業界では、素子の最小幅はサブミクロン領域に入り、即発ガンマ線分析による高感度不純物分析や、物性評価が必要になっている。また、生物学分野においても細胞内の水の振舞いの観察や微小領域における重金属など特定元素のマッピングなどミクロ領域の観察、分析が期待されている。さらに、マイクロマシンの潤滑剤層、冷却流路系などのミクロ領域での非破壊診断なども非常に重要な分野である。これらの分野で、軽元素特に水素に敏感で、磁性体等の磁気構造が分かる中性子は X 線等では得られない極めて重要な情報を得ることができる。

中性子マイクロビームの開発には、当該ビームを評価するため、さらに当該ビームによるイメージングを行うための高空間分解能二次元検出器が不可欠である。現在、中性子イメージングには、イメージングプレート¹⁾が開発されており、空間分解能約 $50 \mu\text{m}$ が達成されている。本研究では、さらにマイクロメートル領域のイメージング技術を進展させるため、X 線分野で開発されているズーミング管検出器を、高分解能二次元中性子検出器として応用する、試作及び特性評価実験を行うものである。

2. X 線ズーミング管（X 線透過型光電面検出器）

Fig.1 に X 線ズーミング管システム²⁾の概要を示す。当該システムは、浜松ホトニクス(株)で開発している X 線顕微鏡用の検出器で、X 線像を光電面上に結像し、ここで光電子像に変換し、電磁集束拡大電子レンズによりマイクロチャンネルプレート (M C P) の入力面上に拡大結像する。ここで、電子増倍され、蛍光面で可視光像に変換される。この可視光像を C C D カメラで読み出したものを、積算などの画像処理をし、モニター上で観察する。この管及びそれを用いた T V システムは、(1)空間分解能が、 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ と極めて高い（光電面上での値）(2)拡大率が 10 倍から 200 倍の範囲で任意に設定できる。(3)光電面上視野が管拡大率 10 倍のときで 2.5mm と広い、などの特徴を有している。また、光電面は、窓材である有機フィルムに光電面として CsI を蒸着しており、eV から keV 領域の X 線に対

して、0.1～1[光電子／入射X線]の検出感度をもつ。本X線ズーミング管は、すでに生物試料観察等への応用がなされている。

3. 中性子コンバータ

X線ズーミング管は、CsI薄膜を持ちいて、X線の光電効果によりX線像を光電子像に変換している。光電子はエネルギーが小さく、飛程が非常に短いため高空間分解能のイメージに適している。一方、中性子は、電荷が無く、物質との間で直接光電子発生反応過程を有しないため、コンバーターを用いる必要があり、コンバーターから発生する荷電粒子又は γ 線によって中性子像を変換、形成する必要がある。この際、

- 1) コンバータから発生する γ 線によってCsIに光電子を発生させることにより中性子像を光電子像に変換する方法
- 2) コンバータから発生する内部転換電子等を材料内で減速させ、直接電子像として、ズーミングする方法

の2通りが考えられる。この際、1)では、X線に比べて γ 線領域でのCsIの光電子放出効率が実用に足るかどうかが課題となる。また、2)では、Gdから放出された内部転換電子がズーミング管内の電磁集束拡大電子レンズで結像できるエネルギー領域にあるかどうか、また内部転換電子の飛程が十分小さいかどうか、が課題となる。

中性子散乱実験では、通常、位置分解能、検出効率、計数率、S/N比の重点化によって検出器の種類・コンバータが決まる。コンバーターとしては、通常³He(熱中性子吸収断面積: 5330 barn)、⁶Li(940 barn)、¹⁰B(3840 barn)、¹¹³Cd(20,600 barn)、¹⁵⁷Gd(255,000 barn)が吸収断面積が大きく、自然同位体比材料として、或いは同位体材料が使われる。本研究では、このうち、最も吸収断面積が大きいGdに着目し、CsI薄膜と組合わせを含めて、中性子像の電子像化を検討した。

(1) ガドリニウム-157の特徴

Gdは同位体比15.7%の¹⁵⁷Gdの熱中性子断面積が255,000 barnと非常に大きく(^{nat}Gdでも49,000 barn)、¹⁵⁷Gd(n, γ)¹⁵⁸Gdの核反応を起こす。まず7937 keVもの高いエネルギー準位にまで励起され、そして1 MeV程度の γ 線を数本放出し、その後低いエネルギーの γ 線を放出して¹⁵⁸Gdの基底状態に遷移する³⁾。その様子をFig. 2に示す。即発 γ 線としては79.5 keV～数MeVに至るまでの様々なエネルギーの γ 線を放出する。その内主なものをTable 1に示した。即発 γ 線は1回の反応当たり5.6本、特に500 keV以上の γ 線は4.45本放出される。一方、79.5 keV, 181.9 keVの γ 線の一部は放出される代わりに高い確率でK殻、L殻の電子を放出し、これが転換電子となる。K殻、L殻の結合エネルギーはそれぞれ50.24 keV、7.24～8.38 keVであり、これらの結合エネルギーの損失分が転換電子のエネルギーとなり、29 keV～180 keVである。主な転換電子の放出確率、およびGd中の飛程は文献⁴⁾を参考に計算したところTable 2のようになり、1回の中性子捕獲で約80%の転換

電子を放出することが分かる。これらの転換電子をまともに検出することができれば有効なコンバータとなりうるが、 γ 線との弁別をするための工夫をしなければならない。転換電子の検出効率に関しては複数の論文で計算が行われているが、論文によって結果がまちまちであるので、実際に計算して確かめる必要がある。

(2) ガドリニウムコンバータの転換電子の検出効率およびエネルギースペクトルの計算

Gd 中での電子の減衰定数は ^{157}Gd で $11.6 \mu\text{m}$, $^{\text{nat}}\text{Gd}$ で $12.3 \mu\text{m}$ である。Gd の薄膜内部で放出された転換電子は Gd 原子との衝突を繰り返すのでエネルギーも粒子数も減少する。MCNP-4C(Monte Carlo N-Particle Transport Code System)⁵⁾で中性子がガドリニウム薄膜に入射したときに薄膜の表面から飛び出す転換電子のスペクトルを中性子入射前方面のみ、後方面のみ、および両面について、膜厚 $5 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ の場合について $^{\text{nat}}\text{Gd}$ に関してそれぞれ計算したところ、Fig. 3(a), (b) のようになった。ともに $50 \sim 70 \text{keV}$ 付近のものが最も多いことが分かる。当該電子は、電子像として電磁集束拡大電子レンズが機能するにはエネルギーが高すぎ、膜厚を増加することでさらに減速する必要がある。また、積分を実行すれば検出効率が分かるので、 $^{\text{nat}}\text{Gd}$ と ^{157}Gd の場合について膜厚 $1 \sim 20 \mu\text{m}$ で同様の計算を行った結果、Fig. 4(a), (b) のようになった。つまり、 ^{157}Gd を使えば理論的には熱中性子に対して約 20%、両面使うと 50% 以上の検出効率が得られ、 $2, 3 \mu\text{m}$ の膜厚が最適であることが分かる。しかし、これはコストが非常に高いのであまり現実的ではない。 $^{\text{nat}}\text{Gd}$ であれば、検出効率は熱中性子に対して 10 数%、両面使うと 20 数パーセントで膜厚は $5 \mu\text{m}$ 程度が最も高い。

4. 実験

4.1 ズーミング管の概要

改良型X線ズーミング管の実験配置を Fig.5 に示す。今回用いたX線ズーミング管は、従来の Be 入力窓タイプの光電面部および入力窓部を改良し、中性子検出に対応させた。この部分以外のこの部分以外の電磁コイノレ系および出力像読み出し部は変更していない。

4.2 中性子-電子変換面

中性子-電子変換面の概略を Fig.6 に示す。これまでの X 線実験¹⁾においては、窓材は、厚さ 100nm の有機フィルムを使用しており、この膜に 30nm の Au 下地をつけ、さらにその上に光電面として、CsI を蒸着してある。CsI の膜厚を変えたときの光電面の分光感度特性は、 $160\text{eV} \sim 827\text{eV}$ では 100nm が良く、 $4 \sim 22\text{keV}$ では 300nm が良いという結果が得

られている。

中性子実験では、中性子を Gd 等のコンバーターを用いて、内部転換電子及び γ 線に変換し、 γ 線と CsI フィルムの相互作用によって、1) 光電子を発生させる方法、または 2) 直接内部転換電子を減速させ中性子像に置き換える方法を試みる。中性子実験では、中性子コンバータとし、Gd($t=20\mu m$)および比較として Cd($t=0.5mm$)の二種類を使用し、これらの表面に光電子放出面として CsI を蒸着した物を入力窓に貼り付け使用した。この際、ズーミング管の真空チャンバーへの入力窓として、Al(厚さ 1mm)又は Be(厚さ 0.2mm)を使用した。

4.3 中性子実験装置

実験は、原研 JRR-3において、第 1 回実験を冷中性子ラジオグラフィ装置ポート（特性波長 4Å、中性子束約 $1 \times 10^{+7} n/cm^2/sec$ ）、第 2 回実験を熱中性子ラジオグラフィ装置ポート（特性波長 2Å、中性子束約 $1 \times 10^{+8} n/cm^2/sec$ ）を利用して行った。

4.4 実験結果

(1) アルミニウム(1mm)入力窓実験

本実験で、中性子-光電子変換面として用いたのは、Gd($t=20\mu m$)および Cd($t=0.5mm$)の二種類で、これらの表面に二次電子放出面として CsI を蒸着した物を厚さ 1mm のアルミ入力窓に貼り付け使用した。この光電変換面部の詳細図を Fig.6 に示す。観察試料として、Cd 箔を用いた。

以上の条件により今回の実験で得られた出力像を、Fig.7~9 に示す。また Photo.12 は、分解能評価のため Photo.11 を拡大しプロファイル表示したものである。各写真の下には、撮影時の諸条件等を記入してある。

1) 中性子-電子変換面 (Gd+CsI 無し) の場合 (Fig.7)

(Photo.1) 実験開始前（中性子入射前）の MCP（マイクロチャンネルプレート）のダーク状態を確認した。（ズーミング管拡大率：2.8 倍、撮像時間 30 秒）この結果、MCP 部のノイズは問題が無いことが分かった。

(Photo.2) 中性子ビームを出し、その経路上に LiF タイルを置き、周辺からのノイズ成分のみを観察した。（ズーミング管拡大率：2.8 倍、撮像時間 10 秒）この結果、中性子を入射しても周辺からのノイズ成分は上昇しないことを確認した。

(Photo.3) Photo.2 の条件から LiF を取り去り Gd に中性子をあてて、出力信号を観察し

た。(ズーミング管拡大率：2.8倍、撮像時間10秒) Photo.2に対して、Photo.3で増加した信号がGdと中性子との相互作用で発生する転換電子によるものと思われるが、信号量が極めて小さい。これは、Gdからの転換電子のエネルギーが、CsIからの光電子に比べ、エネルギーが極めて高く、ズーミング管の磁場による拡大収束電子レンズの光学系で結像できなかったためと考えられる。

2) 中性子一光電子変換面 (Gd+CsI・300nm) の場合 (Fig.8)

(Photo.4) 光電変換面に中性子を入射し観察試料は置かずに発光量を観察した。(ズーミング管拡大率：2.8倍、撮像時間10分) この結果、CsIをGd表面につけることにより、信号量が大幅に増加した。

(Photo.5) Photo.4に対して、ズーミング管の拡大率を4.4倍に上げた。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間10分) その結果、信号量が不足し、S/Nが悪い像が得られた。撮像時間の延長又は、信号強度の増加が必要である。

(Photo.6) Photo.5に対して、中性子ビームラインのコリメーションを広げ、中性子強度を約10倍にした。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間10分) この後の試料実験は、このケースと同じ条件で実験を実施した。

(Photo.7) 試料としてCd小片(1mm厚さ)を観察した。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間45分) 写真上部(左右方向)のエッジが研磨により垂直になっている部分で分解能評価に使用した。(写真10参照)

3) 中性子一光電子変換面 (Cd+CsI・300nm,500nm) の場合 (Fig.9)

(Photo.8) 観察試料は置かずに、Cd+300nmの場合の信号強度を観察した。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間6分) この結果、Cd+CsIの信号強度は、Gd+CsIに比べ約10分の1であることが分かった。

(Photo.9) Photo.8の条件から画像を視野外に出し(ズーミング管の磁場を変化させ結像位置を変化させ)、ノイズ成分を観察した。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間6分) この結果、写真8に比べても十分ノイズレベルが低いため問題ないことが分かった。

(Photo.10) 光電変換面をCd+CsI・500nmに替え、Photo.8と同様の条件で信号強度を観察した。(ズーミング管拡大率：4.4倍、撮像時間6分) この結果、CsIを300nmから500nmに厚くすることにより、信号強度は約2.4倍に増加した。

(Photo.11) Photo.10 の条件で、Photo.7 で観察した Cd 小片 (1mm 厚さ) を観察した。(ズーミング管拡大率 : 4.4 倍、撮像時間 15 分) この結果、Gd 変換面の場合 (Photo.7) と異なり、Cd 変換面では、Cd の像がほとんど観察できなかった。これは、CsI が Cd からの β 線ではなく、 γ 線と相互作用して光電子を放出していると予想される。

(Photo.12) Photo.7 の出力像を画像処理装置で拡大表示後、分解能評価のため、プロファイルを表示した。(ズーミング管拡大率 : 4.4 倍、撮像時間 45 分) この結果、エッジ部分での 0-100% の画素数は 10 画素で、Gd 変換面上で、約 $60 \mu\text{m}$ に相当した。

本実験の結果、本装置により、二次元中性子像の検出が可能であることが確認できた。また、当初問題になるかもしれないと思われていた高エネノレギー γ 線、 β 線によるノイズもほとんど無く、リアルタイム観察が可能な二次元中性子検出器としての基本動作が確認できた。ただし、本実験で、

- ①光電変換面上空間分解能が約 $60 \mu\text{m}$ の値しか得られなかった。
 - ②信号量が非常に弱く、拡大率は 4.4 倍までしか上げることができなかった。
- の二点の問題点が明らかとなった。

これらの問題点のうち①については、Fig.6 から分かるように試料一光電変換面間の距離が 1mm 以上あり、試料に入射している中性子ビームが平行でないことによる半影ボケの影響と思われる。

この解決策としては、[a]窓材を検討し、試料と CsI 面との距離を少しでも近づける、[b] 中性子ビームラインにコリメータ等を入れ、中性子ビームを平行化する、等の改良により今回の $60 \mu\text{m}$ よりも大幅に改善が可能と思われる。ただし、本実験では、信号量の問題により拡大率を上げることが出来なかつたため、変換面の分解能を上げる際には、以下の方法で信号量を増やす対策も同時に行う必要がある。

②の信号量の問題に関しては、[c]中性子ビーム取り出し口に検出器を少しでも近づけるようにする(今回は 2m)、[d]CsI の膜厚の最適化による感度の向上、により今回よりも大幅に改善が可能と思われる。

また、CsI の膜厚による感度変化は、以下の通りであった。

	Gd+ CsI・無し	Gd+ CsI・300nm	Gd+ CsI・500nm	Gd+ CsI・1000nm	Gd+ CsI・300nm	Gd+ CsI・500nm
信号強度 (相対値)	~0	~100	120	143	21	50

本実験範囲においては、CsI 膜厚は厚いほど感度が良い結果が得られたので、今後、最適

膜厚を検討する必要がある。

また、光電変換面は、変換面の厚みおよび上記感度比較データより、今回用いた Gd と Cd では、Gd の方が試料-CsI 間距離を近づけられ、なおかつ高感度のため、Gd で今後の実験を進めることとした。

(2)ベリリウム(0.2mm)入力窓実験

第 2 回実験は、第 1 回実験であげられた下記の問題点、

- ① 試料一光電変換面部の距離が長い(1mm)ため空間分解能が悪い。
- ② 中性子量が不足していたため観察時の拡大率を上げることができない。

等の問題を考慮して、

対応 i) 入射窓部を改造し試料一光電変換面部の距離を前回の約 1mm から約 $120 \mu m$ まで近づける

対応 ii) より高強度の中性子を利用するため JRR-3M 热中性子ビームラインを用いる。

こととし再実験を行った。

実験は JRR-3 の中性子ラジオグラフィ装置ライン(TNRF-2)において行った。実験配置図は Fig.5 と同様である。本実験で用いた改良型 X 線ズーミング管は外観は前回と同じタイプで、光電変換面部のみを新たに設計・製作した。今回用いた光電変換面部の詳細図を Fig.6 に示す。(a)は前回の Al 構造で、(b)今回実験に用いた改良型の Be 光電変換面部である。前回との改良点は、真空気密窓をアルミ 1mm からベリリウム・ $100 \mu m$ まで薄くした点である。これにより、試料-Gd 表面間の距離は、前回の約 1 mm m から今回は約 $120 \mu m$ まで近づける事ができた。なお今回光電変換面として用いたのは、Gd($t=20 \mu m$)のみで、前回用いた Cd($t=0.5-5 mm$)は距離の問題があり採用しなかった。Gd 表面の CsI は、 $0.3 \mu m$, $0.5 \mu m$, $1 \mu m$, $1.5 \mu m$, $2 \mu m$ および $3 \mu m$ の 6 種類を準備したが、実験時間の関係で $0.3 \mu m$ のみしか評価はできなかった。なお、観察試料は、研磨により垂直を出した Cd 小片を Be 入力窓に貼り付け衝察を行い、そのエッジのキレにより分解能の評価を行った。

以上の条件により今回の実験で得られた出力像を、Fig.11 にしめす。また Fig.12 は、分解能評価のため Photo.15 を拡大しプロファイル表示したものである。各写真の諸条件を以下に示す。

No.	光電変換面	CsI 膜厚	管部拡大率	写真上拡大率	積算時間
1	Gd($20 \mu m$)	$0.3 \mu m$	2.8 倍	16 倍	10 秒間
2	"		4.4 倍	25 倍	10 秒間
3	"		10 倍	57 倍	30 秒間
4	"		10 倍	80 倍	30 秒間

4)ベリリウム窓 0.1mm 実験 Gd+CsI・300nm (Fig.11)

(Photo.13) 試料として Cd 小片 (1mm 厚さ) を置き、最小倍率で観察した。(ズーミング管拡大率 : 2.8 倍、撮像時間 10 秒) 中性子強度が増加したことにより、S/N が向上している。

(Photo.14) Photo.13 にくらべ倍率を拡大して観察した。(ズーミング管拡大率 : 4.4 倍、撮像時間 10 秒)

(Photo.15) さらに倍率を拡大して観察した。(ズーミング管拡大率 : 10 倍、撮像時間 30 秒)

本実験の結果、改良型光電変換面により約 $25\text{--}40 \mu\text{m}$ 程度の分解能が確認できた(範囲のあるのは、Photo.16 の条件では S/N が充分ではなくプロファイルが場所毎に多少異なっていたためである)。また、今回のビームラインを使用すれば前回に比べかなり短時間で S/N の良い画像が得られることも確認できた。

なお、今回得られた分解能は約 $30 \mu\text{m}$ 程度であり、X 線ズーミング管の最高分解能に対してまだ二桁位悪くなっているが、この制限要因は主に試料—Gd-CsI 間の距離(約 $120 \mu\text{m}$)によるものと思われ、この点を考慮に入れれば今回の検出系においてはほぼ予定通りの値が得られたと思われる。

5. 結論

本実験では、X 線ズーミング管 (X 線透過型光電面検出器) を中性子マイクロイメージングへの応用の可能性を検討した。その結果、

- (1) 中性子線用ズーミング管の空間分解能は、試料から光電面との距離で決まる (距離 1mm で分解能約 $60 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ で約 $25 \mu\text{m}$) ことが分かった。さらに、入力窓厚を薄くし距離を短縮することで、本来 X 線ズーミング管が持つ $0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$ の空間分解能に近づけることが分かった。
- (2) 中性子コンバータ (Gd、Cd) からの γ 線で CsI の光電子放出を十分な量誘起できることが分かった。また、Gd 等からの内部転換電子は、イメージングに寄与せず、 β 線の飛程 (70keV で約 $20 \mu\text{m}$) が検出器の空間分解能に影響しないことが分かった。
- (3) 中性子ズーミング管は、十分なコントラストがつく吸收体であれば、2 次元イメージング可能であることを確認した。

また、今後の課題として、

- (4) CsI が 300nm に比べ 500nm のほうが光電子放出効率が高いことが分かったが、最適厚さを求める必要がある。

(5)Gd の薄膜厚さのズーミング管の信号強度、空間分解能に与える影響を検討する必要がある。

以上を解決することにより、 $1 \mu\text{m}$ オーダーの極小空間分解能 2 次元中性子検出器を実現できる可能性を得た。

謝 辞

中性子利用研究センター中性子産業利用促進グループ主任研究員片桐政樹博士、中性子利用研究センター中性子装置開発研究グループ山岸秀志課長代理には、本研究全般について有意義なコメントを頂きました。

参考文献

- 1)Y. Karasawa, N. Niimura, I. Tanaka, J. Miyahara, K.Takahashi, H. Saito, A. Tsuruno, M. Matsubayashi, Physica B 213 & 214 978 (1995)
- 2) K. Kinoshita, T. Matsumura, Y. Inagaki, N. Hirai, M. Sugiyama, H. Kihara, N. Watanabe, Y. Shimanuki, SPIE Vol. 1741 (1992) pp.287-293
- 3) B. Gebauer : Second International Workshop on Data Acquisition Systems for Neutron Experimental Facilities (DANEF-2000), Dubna, Rssia, June 5-7, 2000
- 4) R.C. Creenwood, C.W. Kock, D. Breitig, O.W.B. Schult, B. Fogelberg, A. Backlin, W. Mampe, T. Von Egidy and K. Schreckenbach : Nucl.Phys. A, 304, 327, (1978)
- 5) J.F. Briesmeister (Ed.) : "MCNP -A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A", LA-12625 (1993)

Table 1 Prompt γ ray from $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ reaction

Prompt gamma [keV]	Intensity [1/reaction]
79.51	0.345
181.93	0.648
897.59	0.116
944.09	0.302
962.06	0.193
977.06	0.136
1107.63	0.159
1119.16	0.110
1185.99	0.151
1187.13	0.133
6750.00	0.098
>500	4.45
Total	5.6

Table 2 Abundance and Range of conversion electron

Energy of conversion electron [keV]	Abundance %	Range [μm]
29.3	23.83	5.2
71.2	39.61	21.9
78.2	9.65	25.5
131.7	4.35	59.4
173.6	1.56	91.2
180.6	0.40	97.0

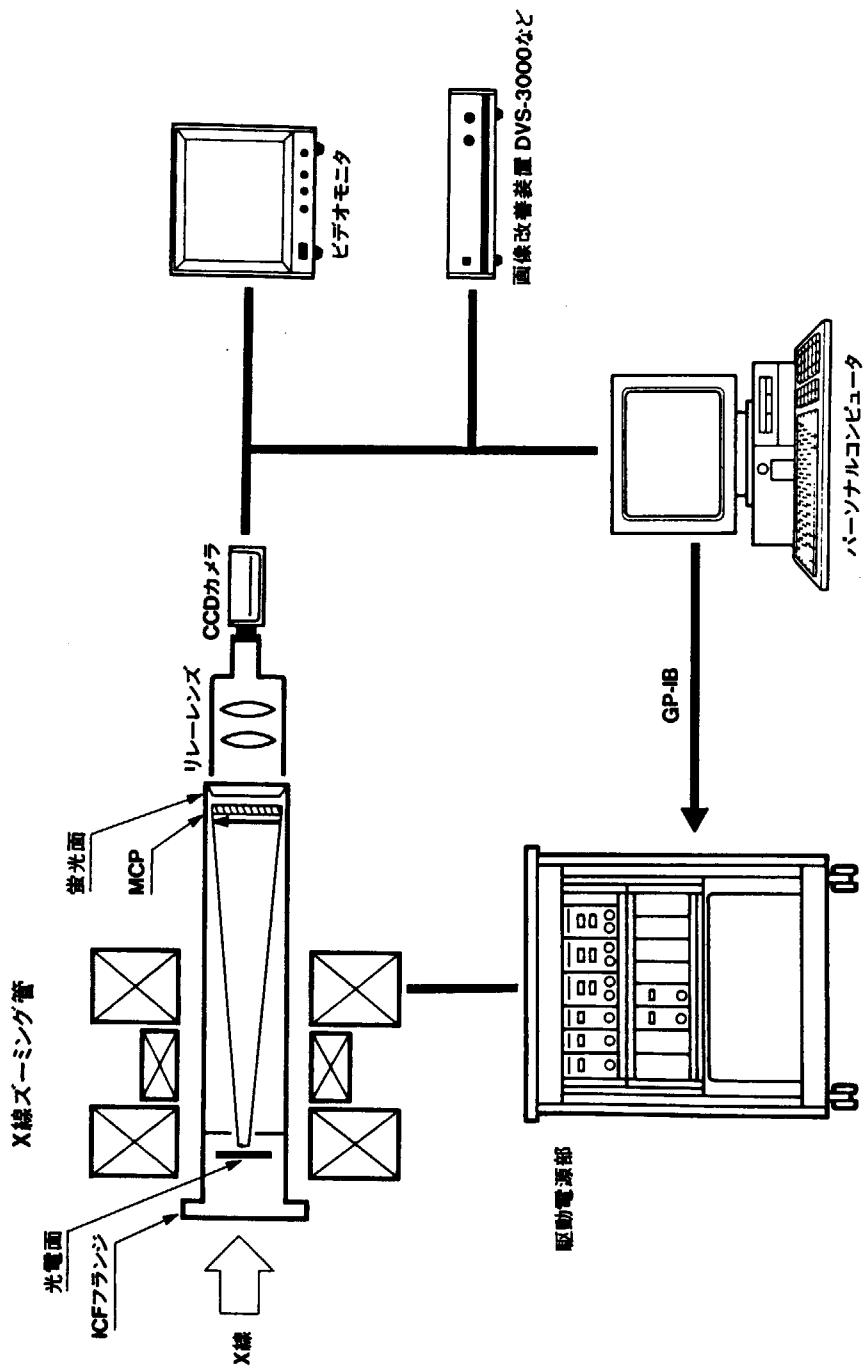


Fig.1 Schematic drawing of electronic zooming TV readout system for an X-ray microscope

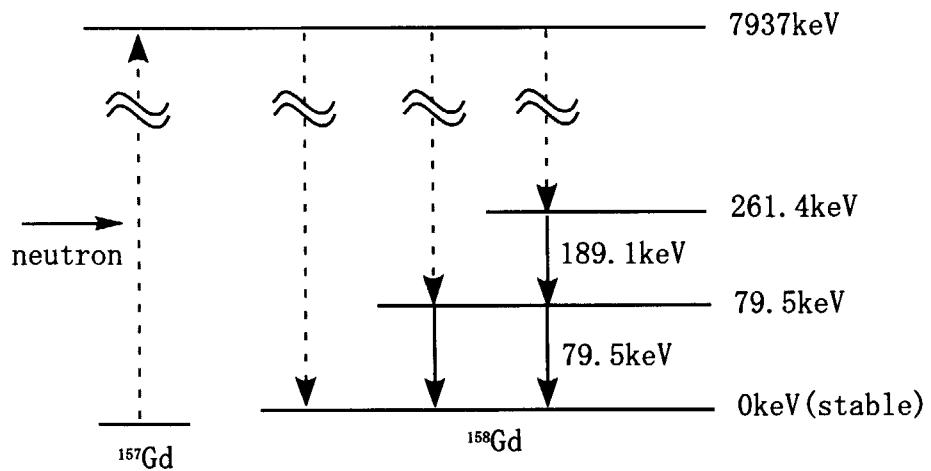


Fig. 2 Decay model of $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

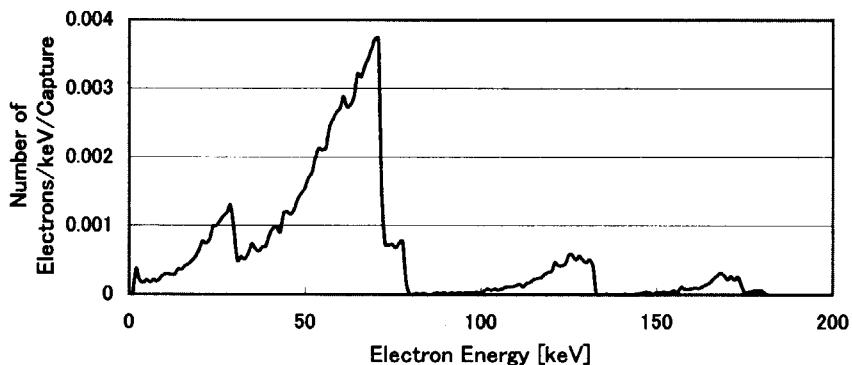


Fig. 3(a) Energy spectrum of conversion electron ($5 \mu\text{m}^{\text{nat}}\text{Gd}$)

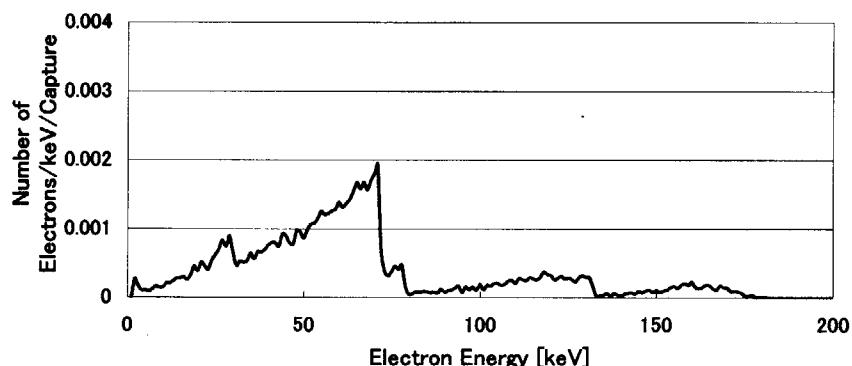


Fig. 3(b) Energy spectrum of conversion electron ($10 \mu\text{m}^{\text{nat}}\text{Gd}$)

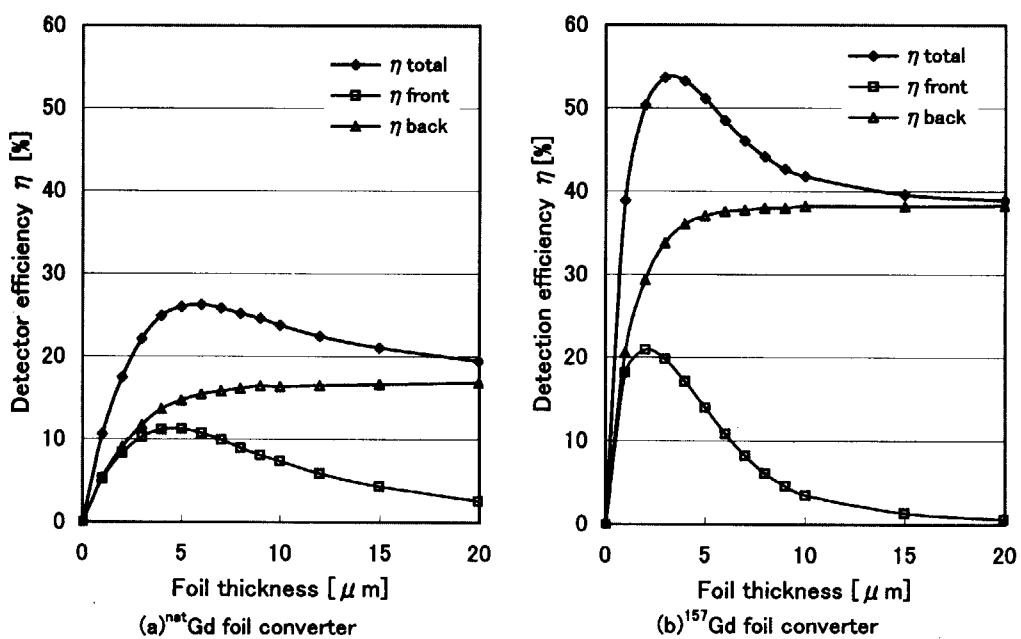


Fig. 4 Theoretical detection efficiency of thermal neutrons for Gadolinium-157 and for natural Gadolinium.

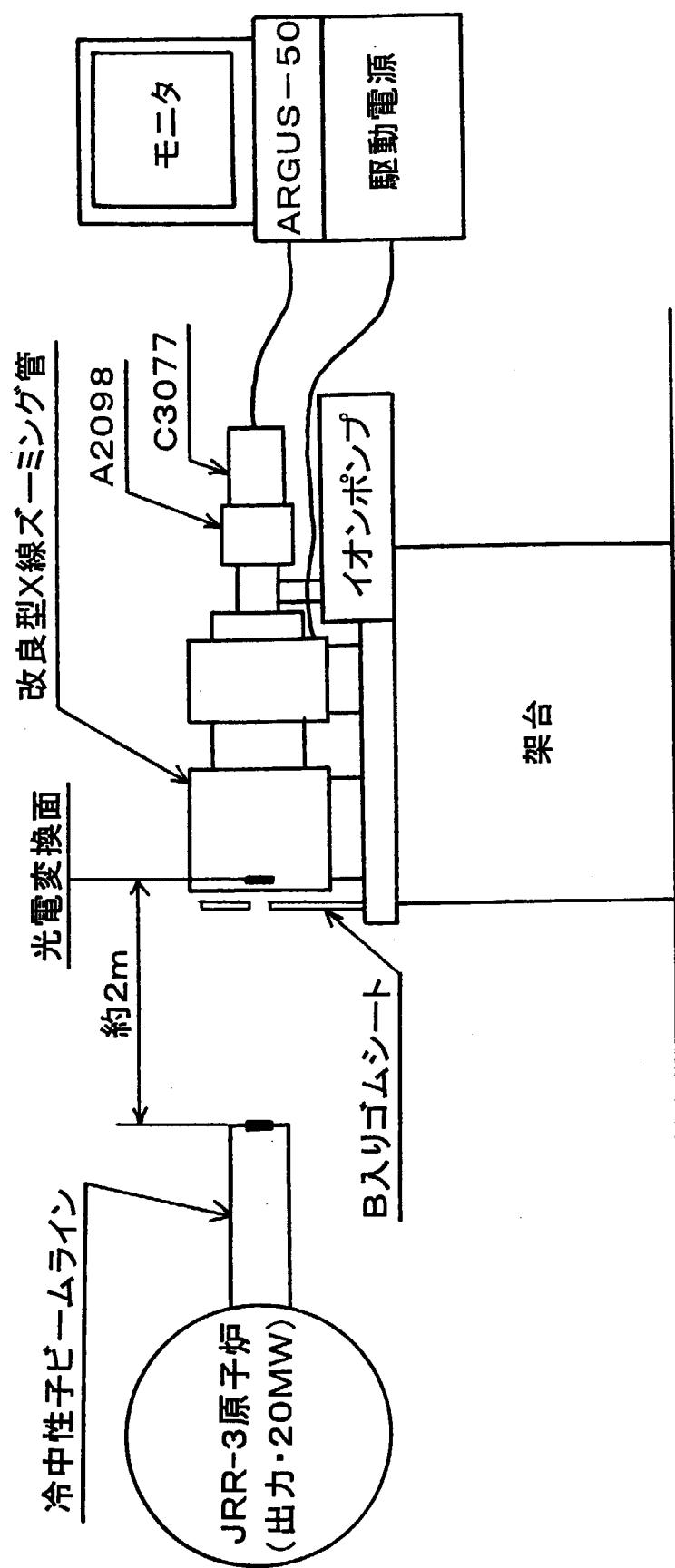


Fig.5 Experimental setup of a zooming detector system

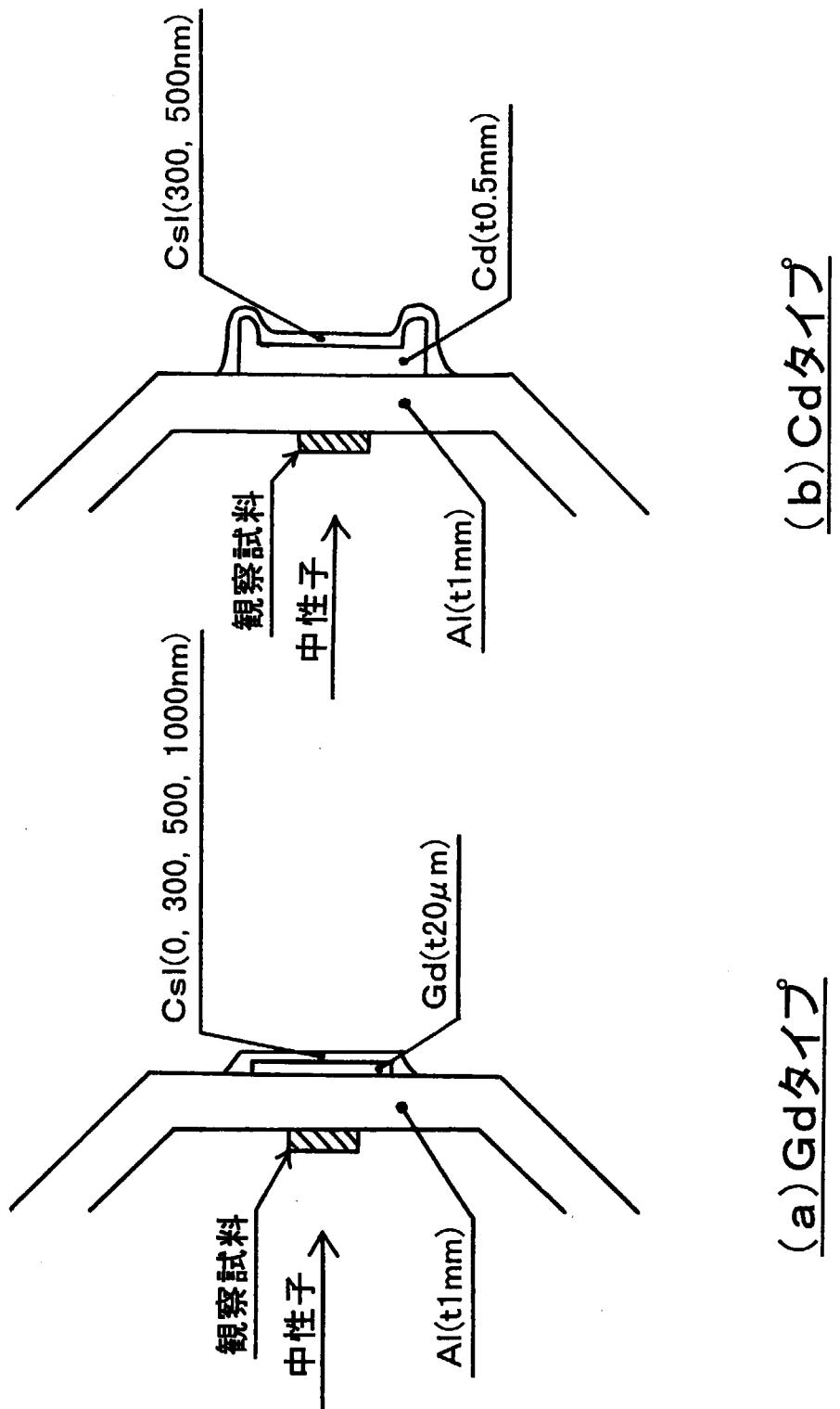


Fig.6 Structure of the photocathode (1st exp.)

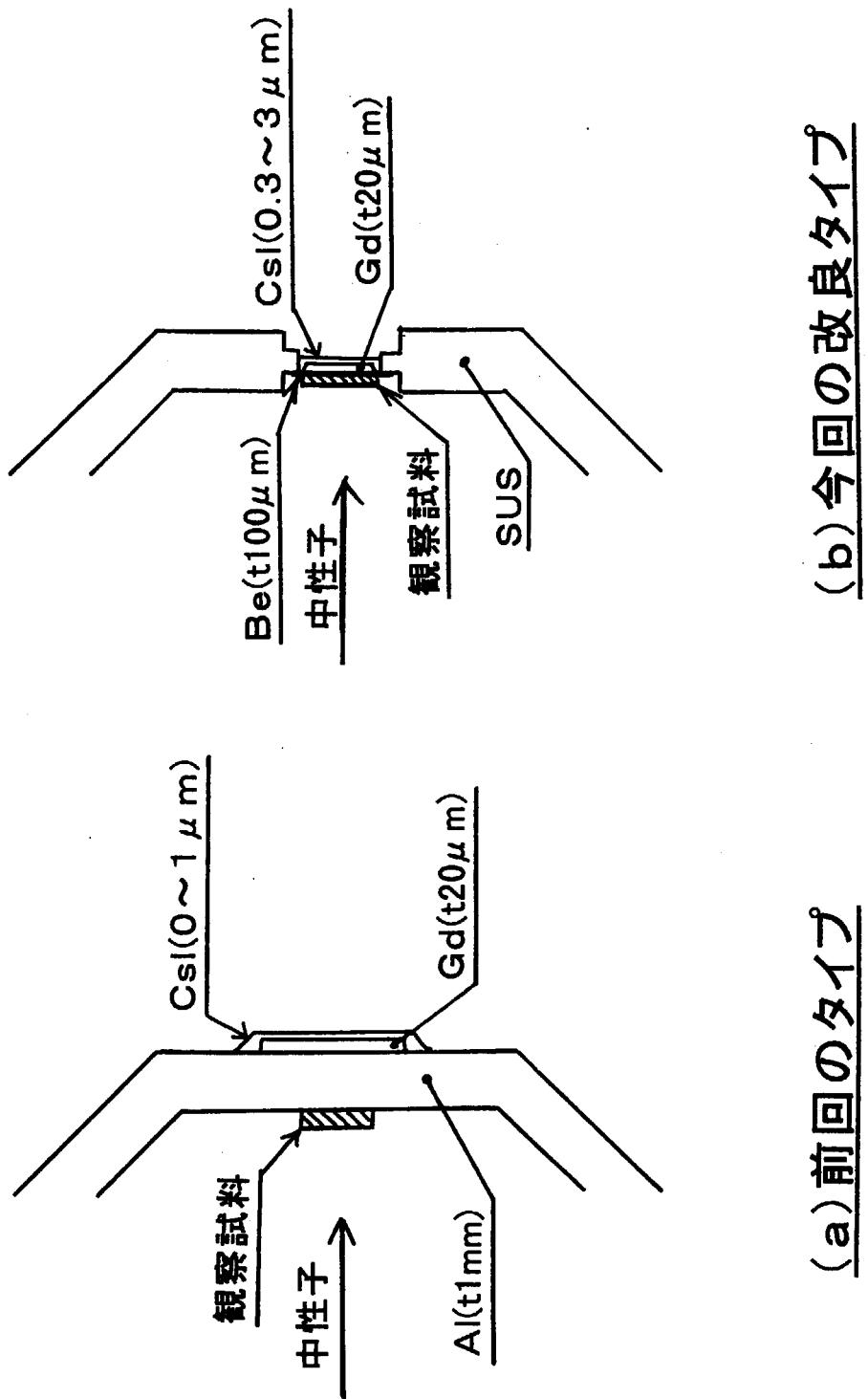


Fig.6 Structure of the photocathode (2nd exp.)

(a) 前回のタイプ

(b) 今回の改良タイプ



Photo.1

- ・実験開始時(中性子入射前)のMCP Assy. のダークの状態を確認した。
- ・ズーミング管拡大率:2.8倍
- ・30秒間積算

MCP部のダークは、問題なし。

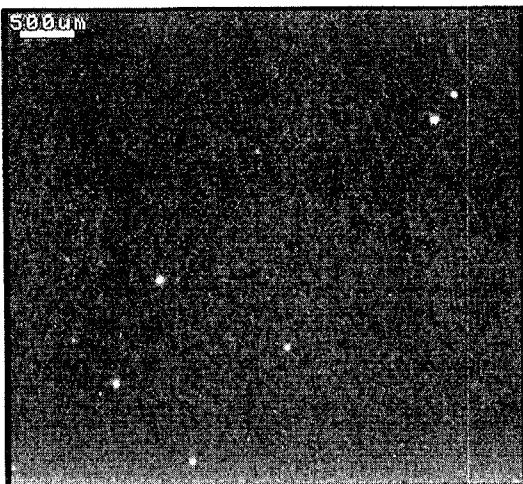


Photo.2

- ・中性子ビームを出し、その経路上にLiFを置き、周辺からのダーク分のみを観察した。
- ・ズーミング管拡大率:2.8倍
- ・10秒間積算

中性子を入射しても、周辺からの
ダークは上昇せず、問題なし。

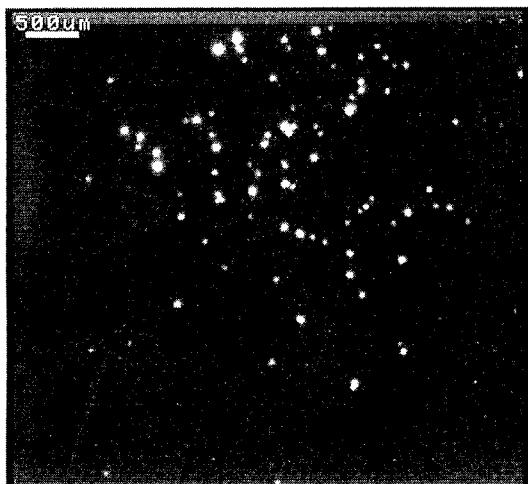


Photo.3

- ・写真2の条件からLiFを取り去り、Gdに中性子をあてて、出力信号を観察した。
- ・ズーミング管拡大率:2.8倍
- ・10秒間積算

写真2に対して写真3で増加した信号
が、Gdと中性子との反応によるものと
思われるが、信号量は極めて少ない。

Fig.7 Integrated video image of No.1 (Gd, Al 1mm)

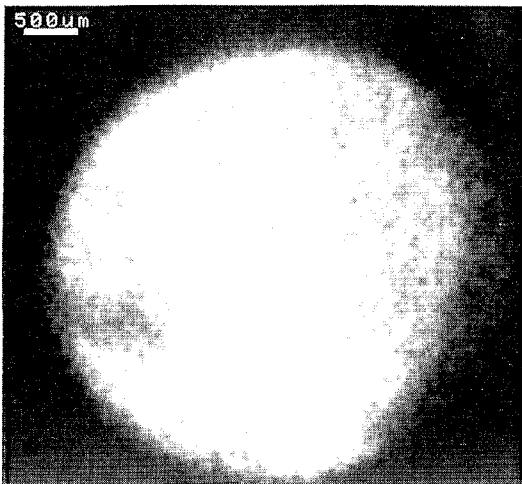


Photo.4

- ・光電変換面全面に中性子を入射し、観察試料は置かずに発光強度を観察した。
- ・ズーミング管拡大率:2.8倍
- ・10分間積算

CsIをGd表面につけることにより、信号量が大幅に増加した。

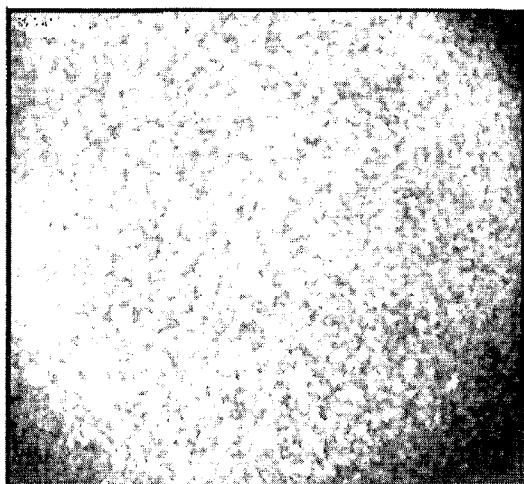


Photo.5

- ・写真4に対して、管体の拡大率を上げた。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・10分間積算

信号量が不足しており、10分間の積算を行っても、S/Nの悪い画像しか得ることができない。

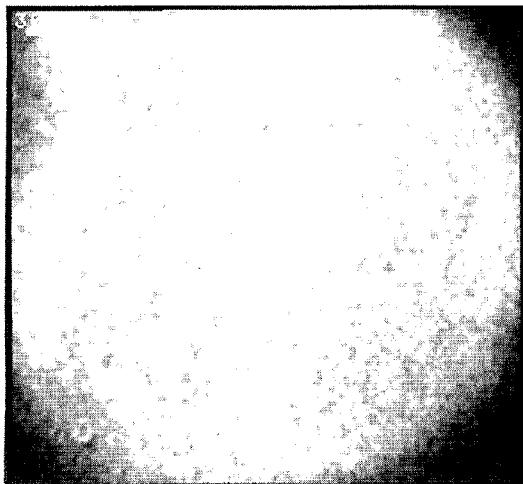


Photo.6

- ・中性子ビームラインのスリットを広げ、線量を写真5に対し約10倍にした。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・3分間積算

3分間の積算である程度の信号量が得られるようになったため、以後この条件で実験を進めていく。

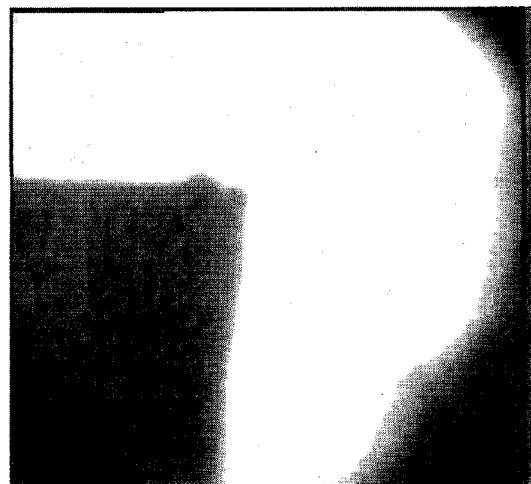


Photo.7

- ・写真8とは別のCd小片(t1mm)を観察。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・45分間積算

写真上側(左右方向)のエッジが研磨により垂直になっている部分。分解能評価は、写真16参照。

Fig.8 Integrated video image of No.2 (Gd + CsI-300nm, Al 1mm)

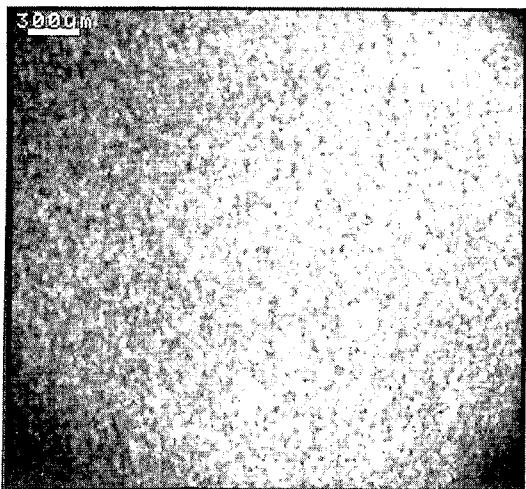


Photo.8

- ・観察試料は置かず、Cd + CsI・300nmの場合の信号強度を観察した。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・6分間積算

Cd + CsIの信号強度は、Gd + CsIに比べ、約10分の1。

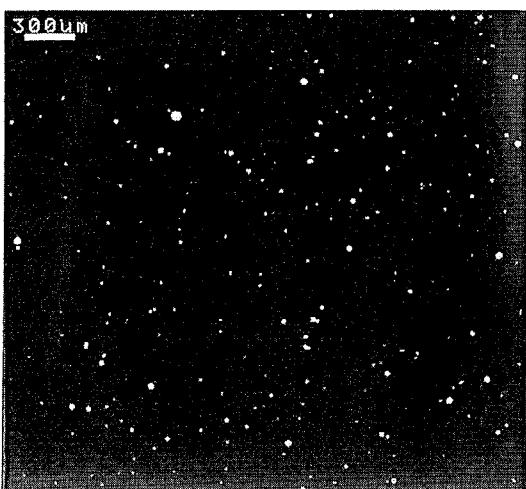


Photo.9

- ・写真8の条件から偏向コイルにより、画像を視野外に出し、ダークを観察。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・6分間積算

写真12に対し、同時間積算しても十分低いレベルのため、問題なし。

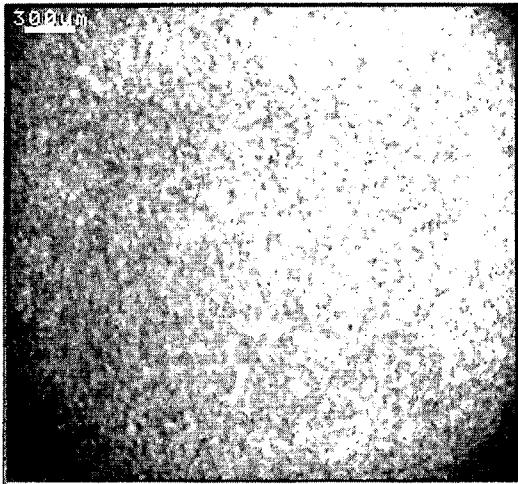


Photo.10

- ・変換面をCd + CsI・500nmに替え、写真8と同様に強度を調べた。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・6分間積算

CsIを300nmから500nmに厚くすることにより、信号強度は約2.4倍に増加した。

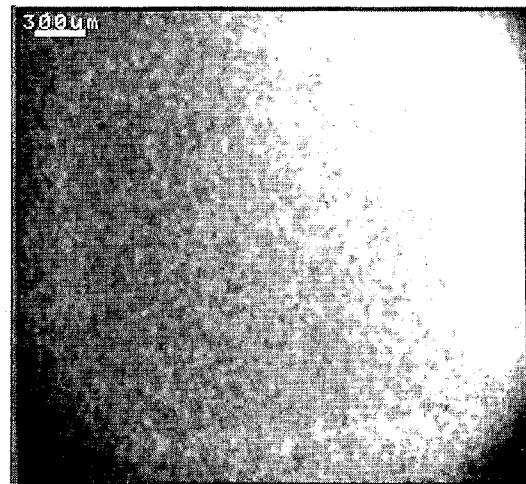


Photo.11

- ・写真10の条件で、写真7で使用したCd小片(t1mm)を観察した。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・15分間積算

Gd変換面の場合(写真9)と異なり、Cd変換面ではほとんど観察ができなかった。

↓
CsIは、Cdからのβ線ではなく、γ線に反応して光電子を放出させているらしい。

Fig.9 Integrated video image of No.3 (Gd + CsI-300nm, 500nm, Al 1mm)

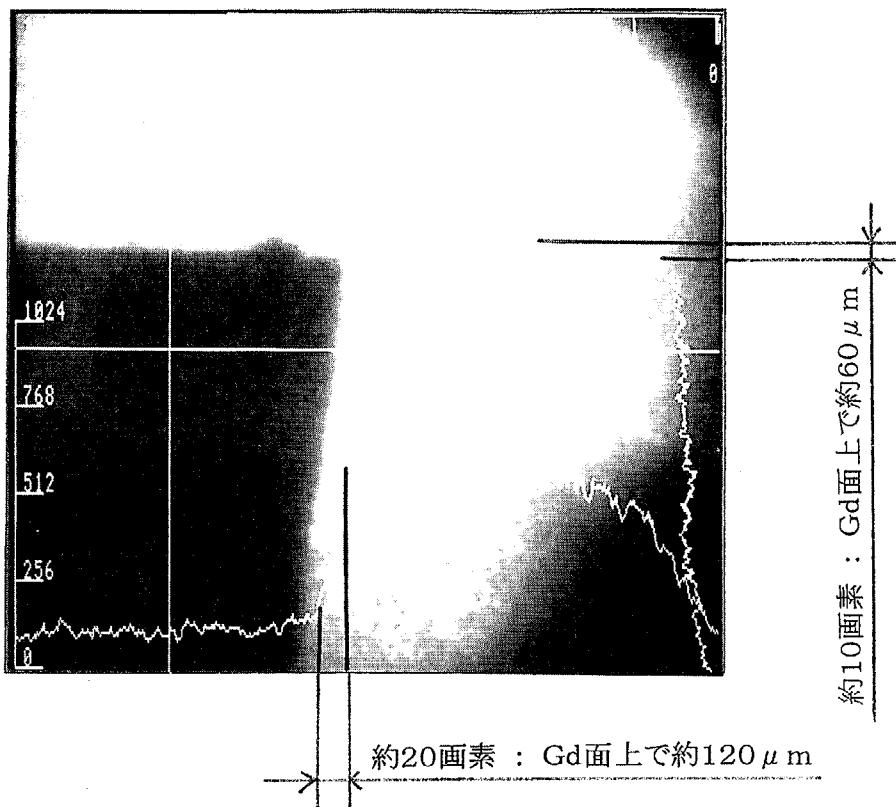


Photo.12

- 写真7の出力像を、画像処理装置にて拡大表示後
分解能評価のため、プロファイルを表示した。
- ズーミング管拡大率:4.4倍
- 45分間積算

エッジ部での0-100%の画素数を分解能とした場合、垂直方向の画素数は10画素で、
Gd変換面上で、約60 μm に相当。

Fig.10 Integrated video image of No.4 (Gd + CsI-300nm, Al 1mm)

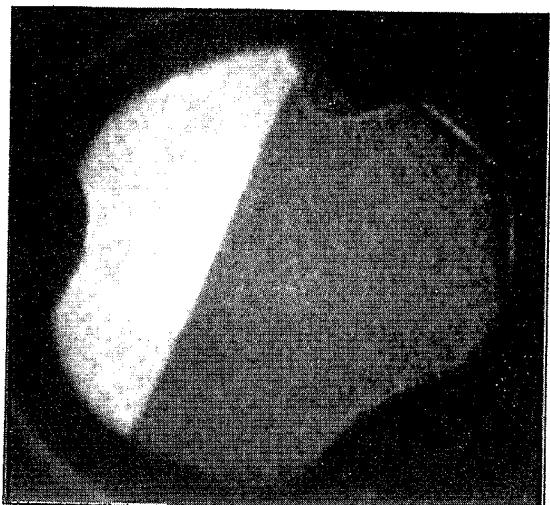


Photo.13

- ・最小倍率により観察。
- ・ズーミング管拡大率:2.8倍
- ・10秒間積算

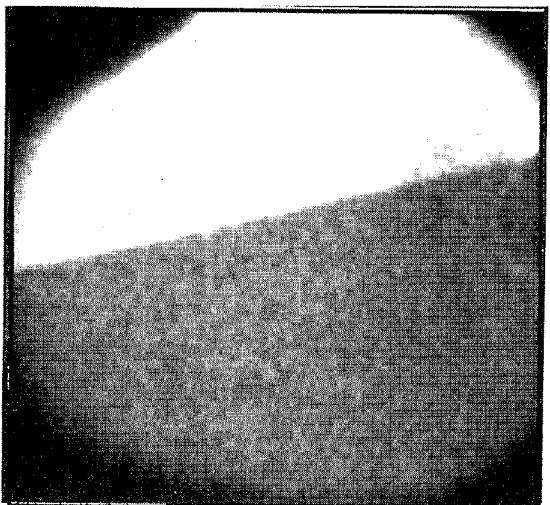


Photo.14

- ・写真13を少し拡大して観察。
- ・ズーミング管拡大率:4.4倍
- ・10秒間積算

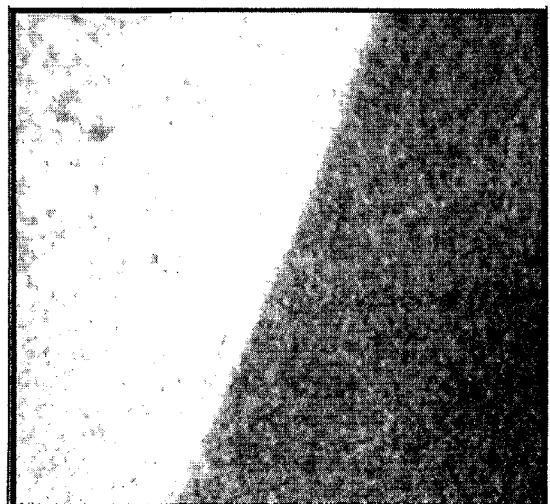


Photo.15

- ・写真14をさらに拡大して観察。
- ・ズーミング管拡大率:10倍
- ・30秒間積算

Fig.11 Integrated video image of No.5 (Gd + CsI-300nm, Be 0.2mm)

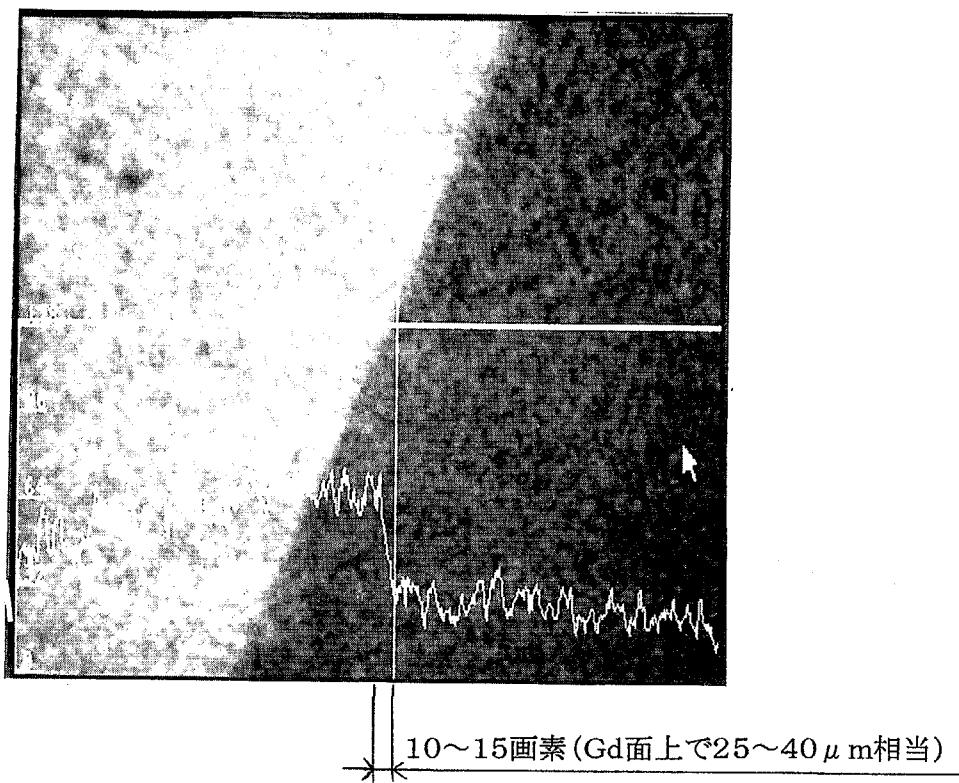


Photo.16

- 写真14の出力像を、画像処理装置にて拡大表示後
分解能評価のため、プロファイルを表示した。
- ズーミング管拡大率:10倍
- 30秒間積算

エッジ部での0~100%の画素数を分解能と
した場合、垂直方向の画素数は10~15画素
で、Gd変換面上で、約25~40 μmに相当。

Fig.11 Integrated video image of No.5 (Gd + CsI-300nm, Be 0.2mm)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-1} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

力 N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf	換算表		
			MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm
1	0.101972	0.224809	1	10.1972	9.86923
9.80665	1	2.20462	0.0980665	1	0.967841
4.44822	0.453592	1	0.101325	1.03323	1
			1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³
			6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²
					51.7149
					1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)	
								1	= 4.184J (熱化学)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.184J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855J (15°C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 735.499W
	1.60218 × 10 ¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻⁹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

高空間分解能中性子ズーミング管検出器の特性

R100
古紙配合率100%再生紙を使用しています