

本資料は 2001. 6. 6 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

TLDバッジ用素子の改良に関する研究

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



TLDバッジ用素子の改良に関する研究

実施責任者 野村 保*
報告者 辻村 憲雄*
二之宮和重*
空増 昇†

要 旨

現在のTLD バッジは γ 線、 β 線、中性子線が測定可能で自動測定により迅速に結果が得られる優れたシステムであるが、ICRP1990年勧告で提言された作業者の被ばく線量当量限度の引き下げや中性子線の放射線荷重係数の上昇等を考慮すると、その検出下限や評価精度の改善が望まれる。このため、より高性能な次世代のTLD バッジの開発を目的として、平成5年度より3年間の予定で新型TLD バッジの技術的基礎に係わる検討を開始した。

本報告書は、この新型TLD バッジ開発の一環として行ったTLD 素子の改良に関する研究成果であり、 β/γ 線用TLD素子の生体等価性の改善と中性子線用TLDの高感度化、及び70 μ m、3mm線量当量を直接測定するための構造の検討を行った。その結果、 β/γ 線用TLD 素子については科学技術庁告示第15号別表第4に与える線量当量換算係数とほぼ同じエネルギーレスポンスを持つTLD 素子が得られ、中性子線用については従来よりも約5倍感度の高いTLD 素子が得られた。また、70 μ m及び3mm線量当量の直接測定が可能な構造の実現性が示唆された。

本書は、動力炉・核燃料開発事業団との役務契約によって松下産業機器㈱により実施された研究の成果を事業団がまとめたものである。

契約番号 : 05C6031

事業団担当者 : 榊山寿子、二之宮和重(東海事業所安全管理部安全対策課)

*東海事業所安全管理部安全対策課 †松下産業機器株式会社

第 1 章 緒 言

現在使用している TLD バッジはその開発に着手してから約15年が経過している。その後様々な改良がなされてきたが、TLD バッジに用いる TLD 蛍光体自体の基本特性に関する改良はこれまでなされていなかった。

現行の TLD バッジは合計 8 個の TLD 素子から構成されており、そのうち 7 個が蛍光体にホウ酸リチウムを、1 個が硫酸カルシウムを使用している。硫酸カルシウムを用いた TLD 素子は入射する γ 線のエネルギー情報を得ることを目的としており、線量当量の評価にはホウ酸リチウムを用いた TLD 素子を使用している。

β/γ 線による線量当量を測定する場合、ホウ酸リチウム系の蛍光体は実効原子番号が生体のそれに近く組織吸収線量の直接測定が可能であるため、ほぼ理想に近い TLD といえる。しかし、厳密にはホウ酸リチウムの実効原子番号は生体のそれよりもやや小さな値であり、科学技術庁告示第15号別表第 4（以下、告示別表第 4）に記載される γ 線 1 cm 線量当量などの量のエネルギー依存性に比べて、低エネルギー側で 20% 程度の過小応答を示す。

一方、中性子線の検出は、ホウ酸リチウム系の蛍光体の場合には蛍光体中の ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 原子核と中性子の核反応によって放出される荷電粒子生成反応を利用することによって行う。従って、TLD の中性子線に対するエネルギー依存性は蛍光体の生体等価性とは無関係に荷電粒子生成反応断面積に依存することになる。 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 、 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応断面積は $1/v$ 型のエネルギー依存性を持つため熱中性子線に対する感度は十分であるものの、線量当量の評価の際に重要な高速中性子線に対する感度は、人体からのアルベド中性子を検出する方式を採用しても小さくならざるを得ない。従って高速中性子線の線量当量評価精度を向上させるには蛍光体の発光効率を増加させることが必要である。

また現行の TLD バッジは、 β 線と γ 線の線量当量を分離評価することが前提となっているが、線量当量の定義に立ち戻って考えると、必ずしも両者を区別して測定する必要はなく、分離評価に伴う固有の誤差要因を解消するという観点から、両者の区別なしに直接測定できるような構造を検討する価値があると考えられる。

本研究では、TLD バッジ用素子の生体等価性の改善、発光効率の増大といった点に関する研究を中心に次世代の TLD バッジを開発するための基礎となる技術の検討を行った。

第 2 章 改良型 TLD 素子の目標仕様

改良型 TLD 素子及びリーダーの目標仕様は以下の通りである。

1) γ 線エネルギー応答特性の改善

β/γ 線測定用 TLD 素子の γ 線に対するエネルギー応答特性を放射線障害防止法令告示別表第 4 (以下、告示別表第 4) に示される 1 cm 線量当量のエネルギー依存性に可能な限り合致させる。

2) 高感度化

TLD 素子の発光効率及びリーダーの検出効率を上げることによって、現在使用している TLD 素子に比べて 4～5 倍の感度を持たせる。

3) 70 μ m 及び 3 mm 線量当量の直接測定

TLD 素子のフィルター厚さや幾何学的配置を検討することによって、70 μ m 及び 3 mm 線量当量の直接測定を可能にする。

第 3 章 γ 線エネルギー応答特性の改善に関する検討

3-1 方法の検討

現行のTLD バッジに使用しているホウ酸リチウム系蛍光体は実効原子番号が7.26であり、他の各種TLD 蛍光体に比べて最も生体の実効原子番号である7.42に近い。参考のため表3-1に各種TLD 蛍光体の基本特性を示す。

TLD の低エネルギー領域でのエネルギー応答特性はその実効原子番号に大きく依存し、生体組織の吸収線量を測定するには人体と同じ実効原子番号を持つ材料が最適となる。図3-1に現在実用化されている各種TLD 蛍光体の自由空間中における照射線量当りの応答特性を示す。図3-1からも明らかのようにホウ酸リチウム蛍光体の場合、低エネルギー領域でやや低い応答を示している。

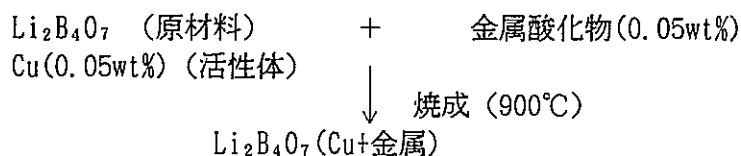
本研究では、ホウ酸リチウム蛍光体に原子番号の大きな金属材料を微量添加し、ホウ酸リチウム蛍光体の実効原子番号を生体のそれに近づけることによって、ホウ酸リチウムを用いたTLD 素子の低エネルギー γ 線に対する過小応答を改善することを試みた。

3-2 金属添加物の選択と焼成方法の検討

ホウ酸リチウム蛍光体に金属材料を微量添加し実効原子番号を大きくする際、これまでのホウ酸リチウム自身の熱蛍光特性に影響を与えないことがその前提条件となる。

(1) 金属材料の微量添加による熱蛍光特性の変化に関する検討

I族からVIII族までの代表的金属を選び、その酸化物(0.05 wt%)を $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 原材料に添加し、約900 °Cで焼成した。その工程を以下に示す。



上の方法によって作成した金属添加 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 蛍光体と現行の蛍光体について ^{137}Cs の γ 線を約 5R *照射し、そのグロー曲線を調べた。その結果を図3-2、3-3に示す。

* 空気吸収線量への換算は、 $K_{\text{air}}[\text{Gy}]=87.6 \cdot X[\text{R}]$ を使用すること。なお本文で扱うTLD素子レスポンスとは、あくまでも従来のTLD 素子に対する相対値でしかなく、照射線量の単位にはレントゲンを用いる。

表3-1 各種TLD蛍光体の基本特性

| 蛍光体 | 主要特性 | | |
|---|---------|--------|-------|
| | 主グローピーク | 実効原子番号 | 発光波長 |
| LiF | 195℃ | 8.14 | 400nm |
| Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn | 220℃ | 7.26 | 600nm |
| BeO:Na | 180℃ | 8.13 | 330nm |
| Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu | 205℃ | 7.26 | 370nm |
| CaF ₂ :Mn | 260℃ | 16.6 | 500nm |
| Mg ₂ SiO ₄ :Tb | 220℃ | 15.3 | 450nm |

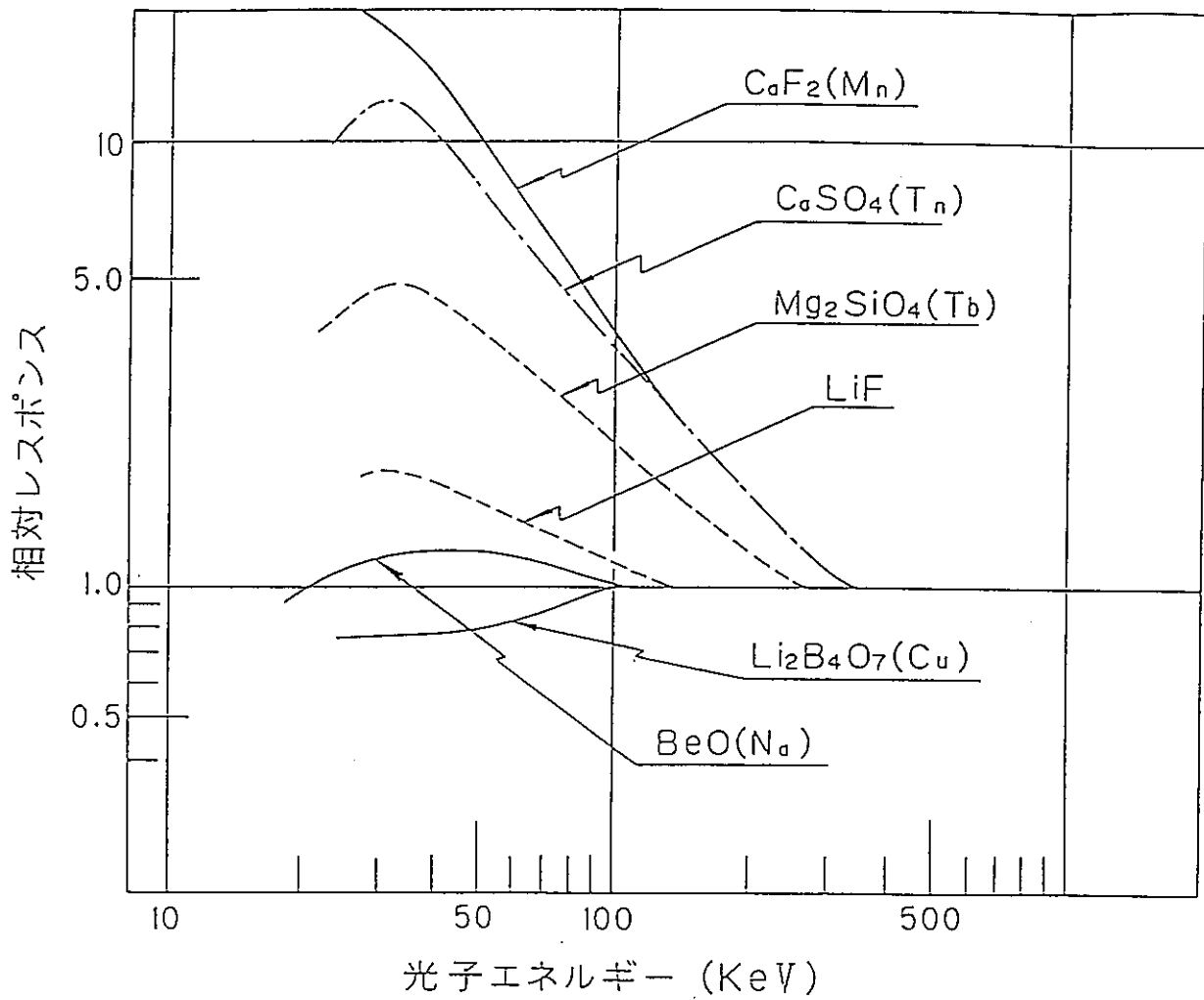


図3-1 代表的なTLD蛍光体の光子エネルギー特性 (自由空間中)

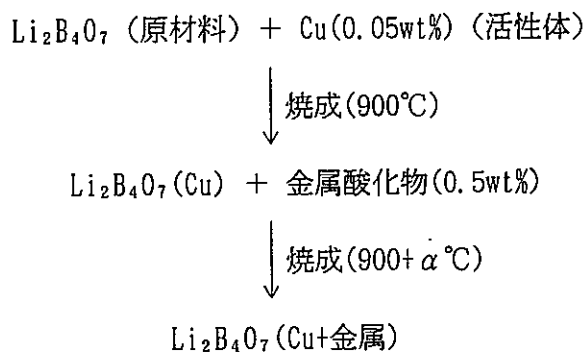
図3-2(a)(b)はI族(Ag)、II族(Zn)を微量添加した場合の蛍光体のグロー曲線であり、相対的な発光効率は現行の蛍光体とほぼ同等であるが、グローピークが温度の低い側(160℃附近)にシフトしている。また、図3-3(a)(b)はVIII族(Fe)、VI族(Cr)を添加した場合であるが、共に現行の蛍光体に比べて著しく感度が低下している。従って、これらI、II、VI、VIII族の金属元素は熱蛍光特性に大きな影響を及ぼし、特にVI、VIII族の金属は妨害元素のため使用できないことがわかる。

次にIII~V族の金属についても同様の工程で蛍光体を作成し、金属添加物の添加濃度を変化させたときのグロー曲線の変化を調べた。一例として図3-4に鉛(IV族)を0.5wt%添加した場合のグロー曲線を示す。金属添加物の濃度を増やすに連れて蛍光体の熱蛍光特性が変化し、I、II族の金属元素を添加した場合と同様に約160℃の単一ピークを持つグロー曲線になった。

これらの試験結果から、原材料であるホウ酸リチウムに活性体である銅とそれ以外の金属添加物を同時に加えて焼成するという方法は、他の金属元素が銅の拡散を妨げホウ酸リチウムの熱蛍光特性に影響を与えることがわかった。そのため金属元素を添加する工程の変更が必要となった。

(2) 焼成工程の検討

金属添加物を加えた場合でも、ホウ酸リチウムの熱蛍光特性を変化させない蛍光体を作成するため、焼成工程を以下のように変更した。



これは、まず $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ として銅の拡散を終え初期の基本特性を持つ蛍光体を完成させた後、金属酸化物を所定量添加し、はじめの焼成温度よりも少し高温で添加元素を拡散させるという方法である。添加金属としてはSn及びPb(VI族)、Al(III族)、Si(IV族)について検討した。

Al、Siを添加した場合のグロー曲線を図3-5(a)(b)に示す。この場合、主ピーク部分の面積(発光効率に相当)は現行のものと大きく違わないが、プリピークが主ピークに比べてかなり大きくなった。経時変化の激しいプリピーク部分の発光は、フェーディングを大きく

するという問題を引き起こす。

また、図3-6(a)(b)にSn、Pbを添加した場合のグロー曲線を示す。主ピークがやや小さくなるものの、グロー曲線の形状が現行の蛍光体とほぼ同じものが得られた。

図3-7に添加物であるPbの濃度を変化させた時のグロー曲線の変化を示す。Pbの濃度が増えるにつれて主ピークが小さくなっている。この原因を探るため、蛍光体結晶内のCuとPbの分布を2次イオン質量分析法によって調べた。図3-8(a)～(f)に蛍光体中のそれぞれCu、Pbの分布状態(写真)を示す。CuとPbの分布はほぼ一致している。このことからCuとPbは合金のような状態で結晶中に存在し、Cuの活性体としての役割がPbによって妨げられることによって、感度が下がると考えられる。

Pbを0.28wt%、0.46wt%添加したホウ酸リチウム蛍光体を試作し、 γ 線に対する照射線量当りのエネルギー応答特性を調べた結果を図3-9に示す。比較のため、現在使用しているホウ酸リチウム蛍光体の応答特性及び法令告示別表第4に与える照射線量-H1cm線量当量換算係数も同図に示す。なお、この実験ではPMMA製平板ファントムに蛍光体を装着した。

図に示すようにPb 0.28wt%添加した蛍光体は、 γ 線の1cm線量当りのエネルギー依存性とほぼ一致した。現行の蛍光体に比べてやや感度が低下するものの実用上問題にならない程度である。以上の検討から完全に生体等価な $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu}, \text{Pb})$ 蛍光体の実用化は十分可能であることが判明した。

3-3 第3章のまとめ

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体に添加する金属とその焼成工程について検討した。その結果、法令告示別表第4の与える1cm線量当量換算係数とほぼ同じ様なエネルギーレスポンスを持つ蛍光体を得られた。

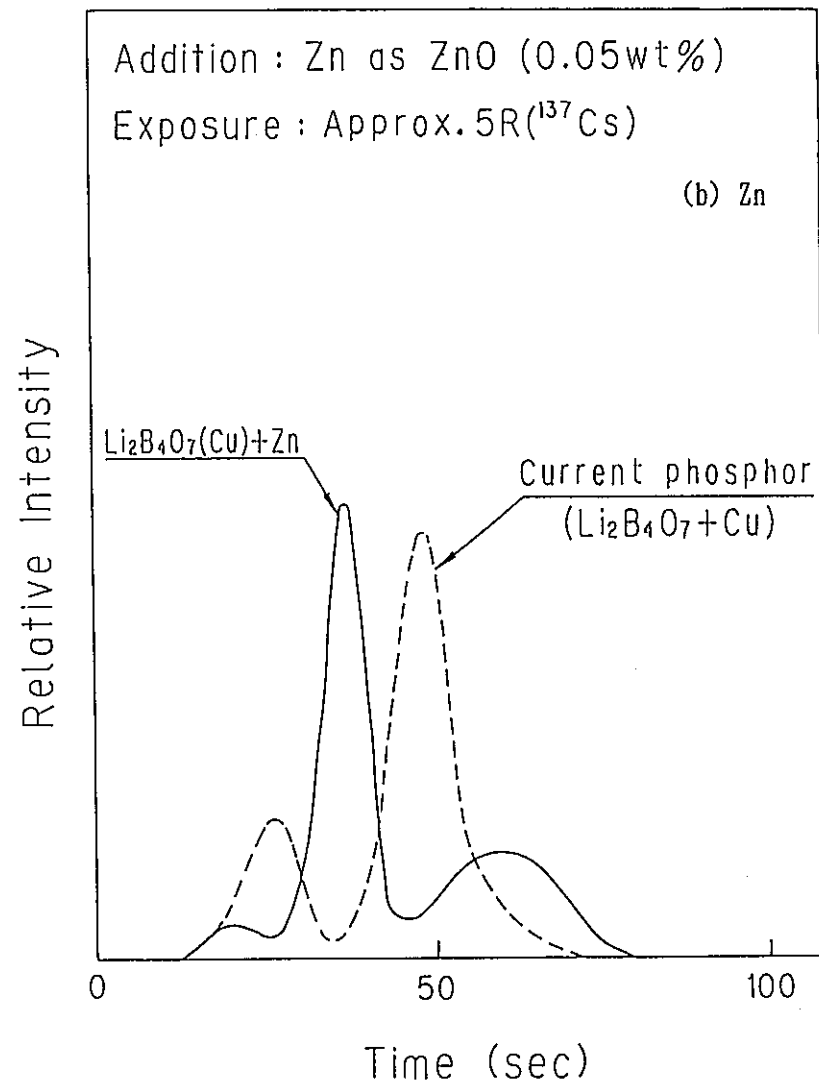
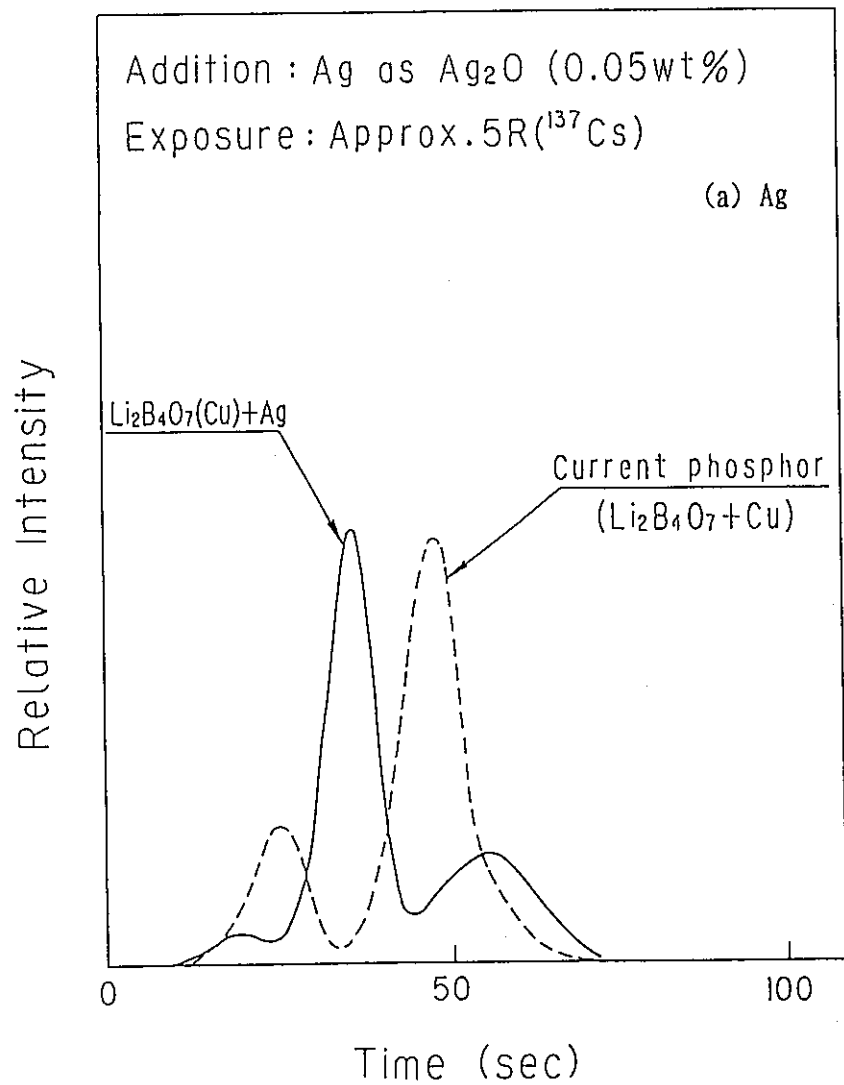


図3-2 (a)(b) Ag、Znを添加した時のグロー曲線

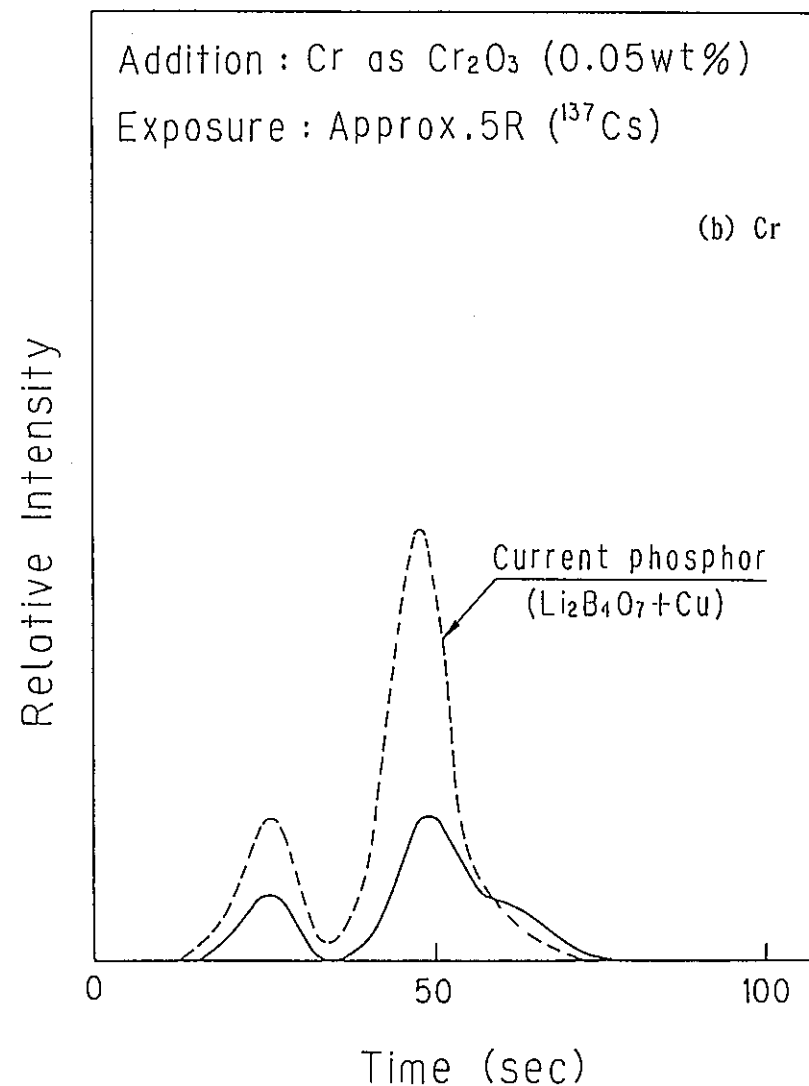
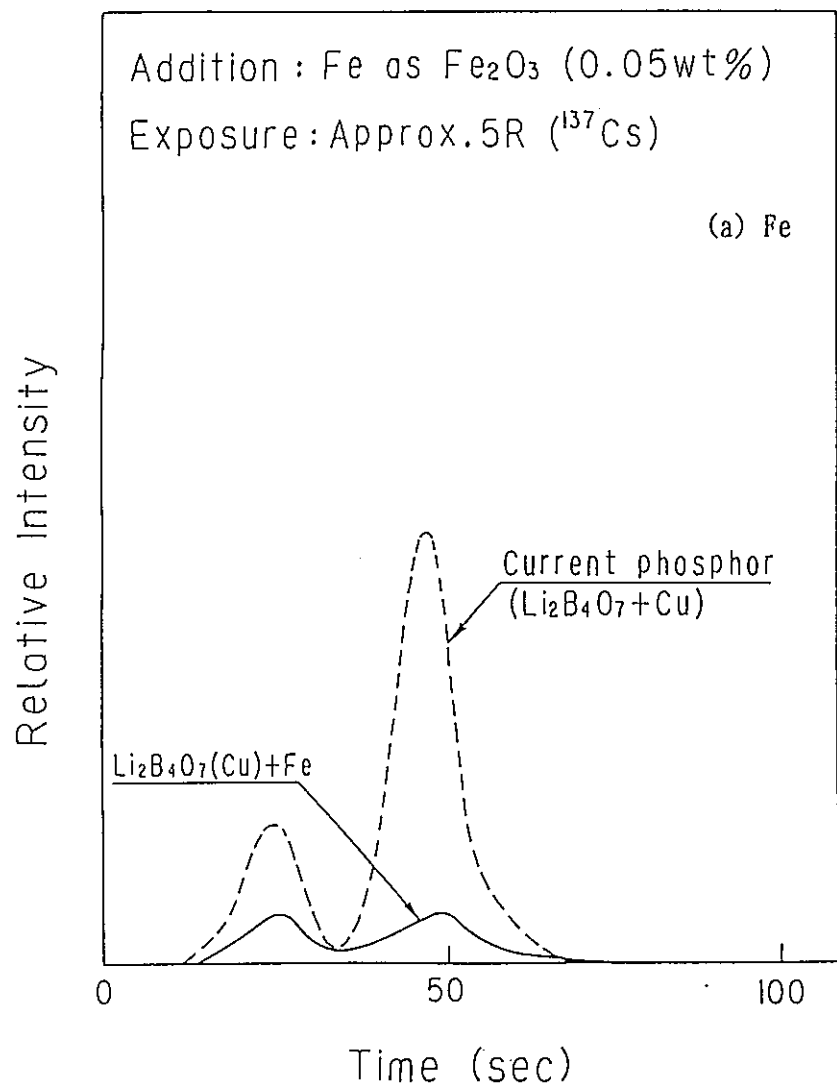


図 3 - 3 (a) (b) Fe、Crを添加した時のグロー曲線

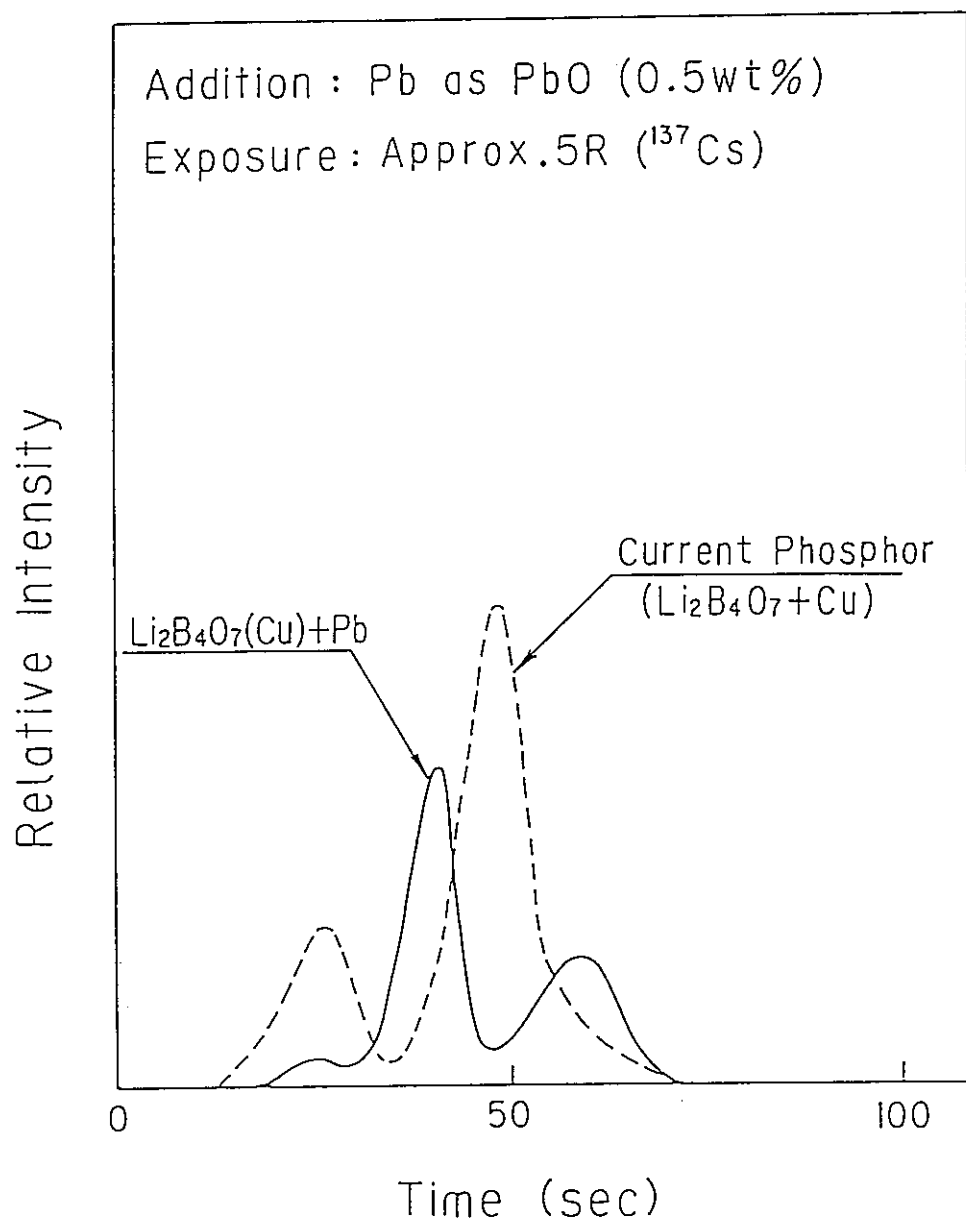


図3-4 Pb(0.5wt%)を添加した時のグロー曲線

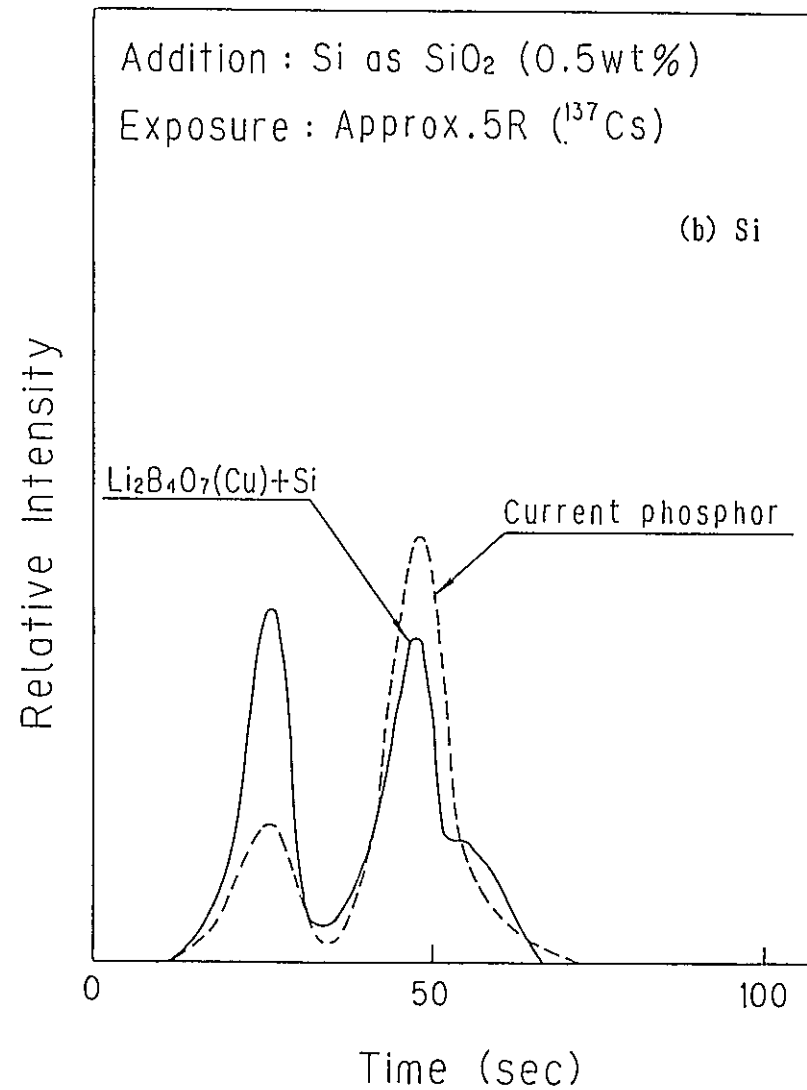
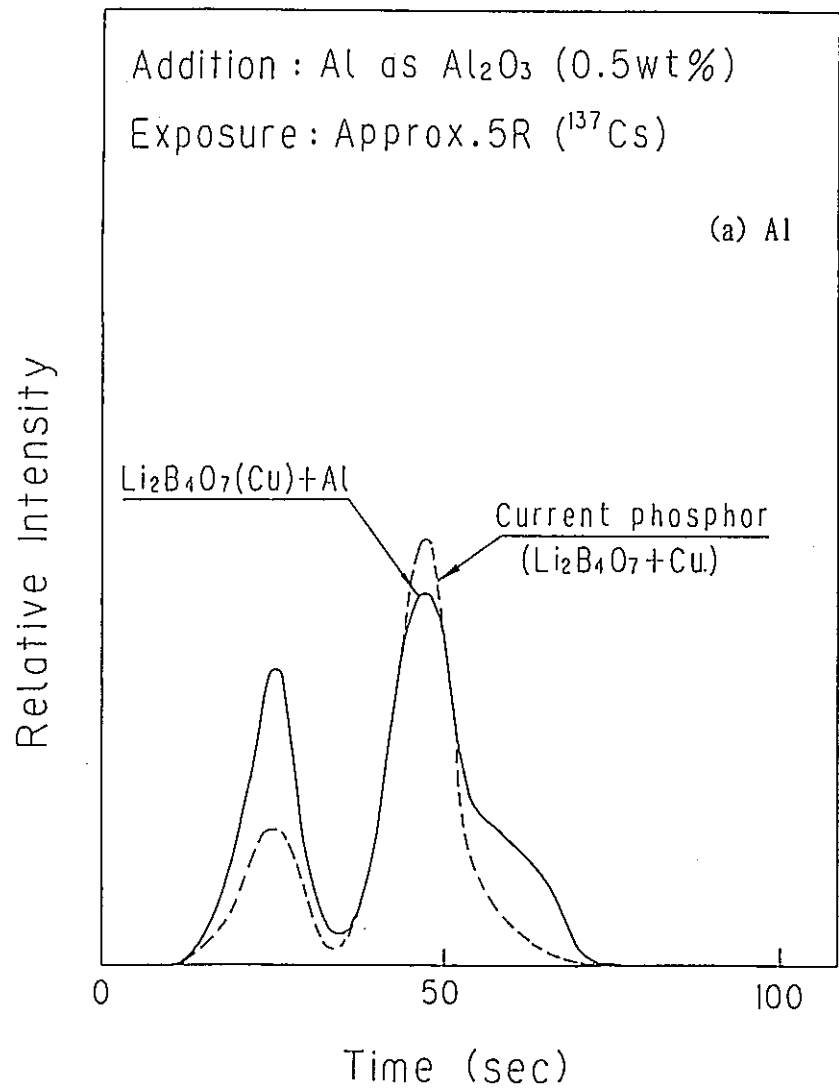


図 3 - 5 (a) (b) Al、Si (0.5wt%) を添加した時のグロー曲線

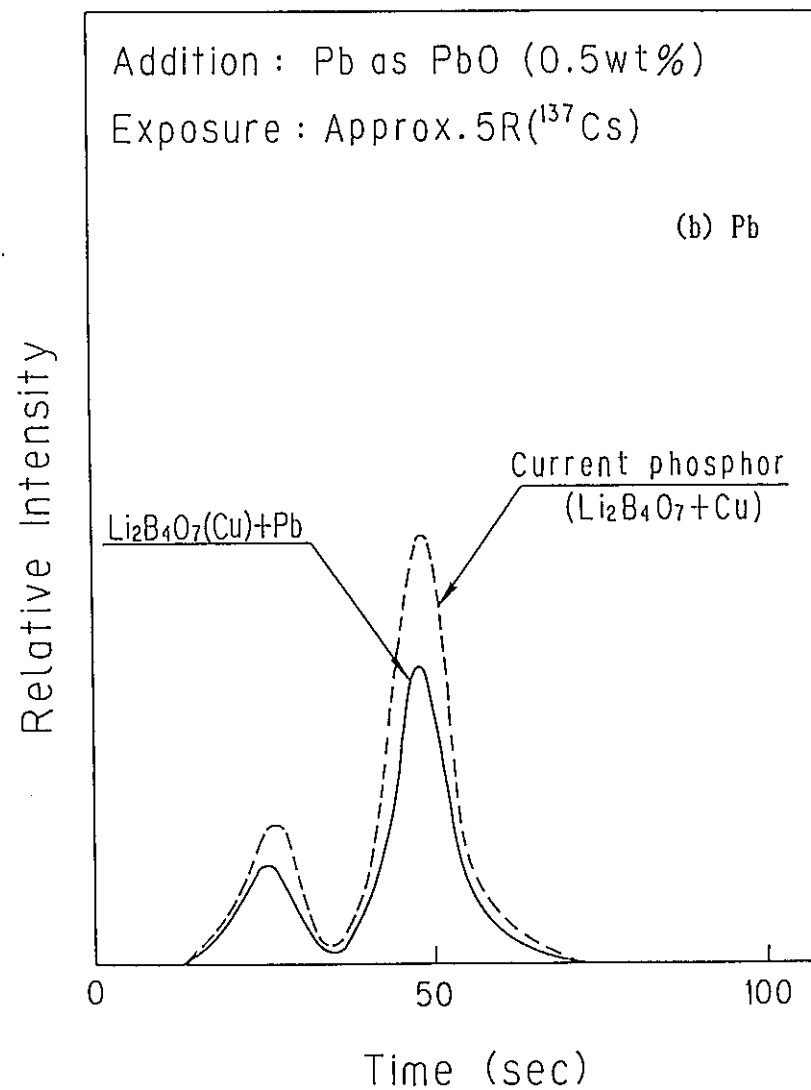
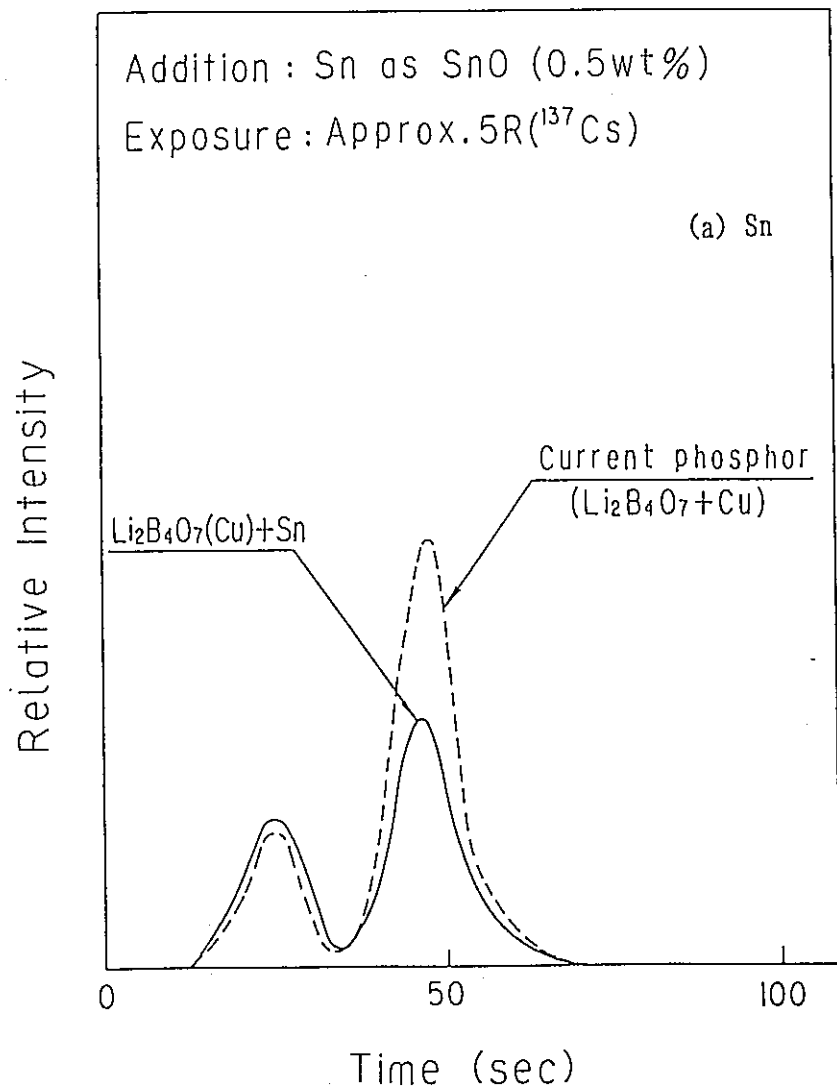


図 3 - 6 (a) (b) Sn、Pb(0.5wt%)を添加した時のグロー曲線

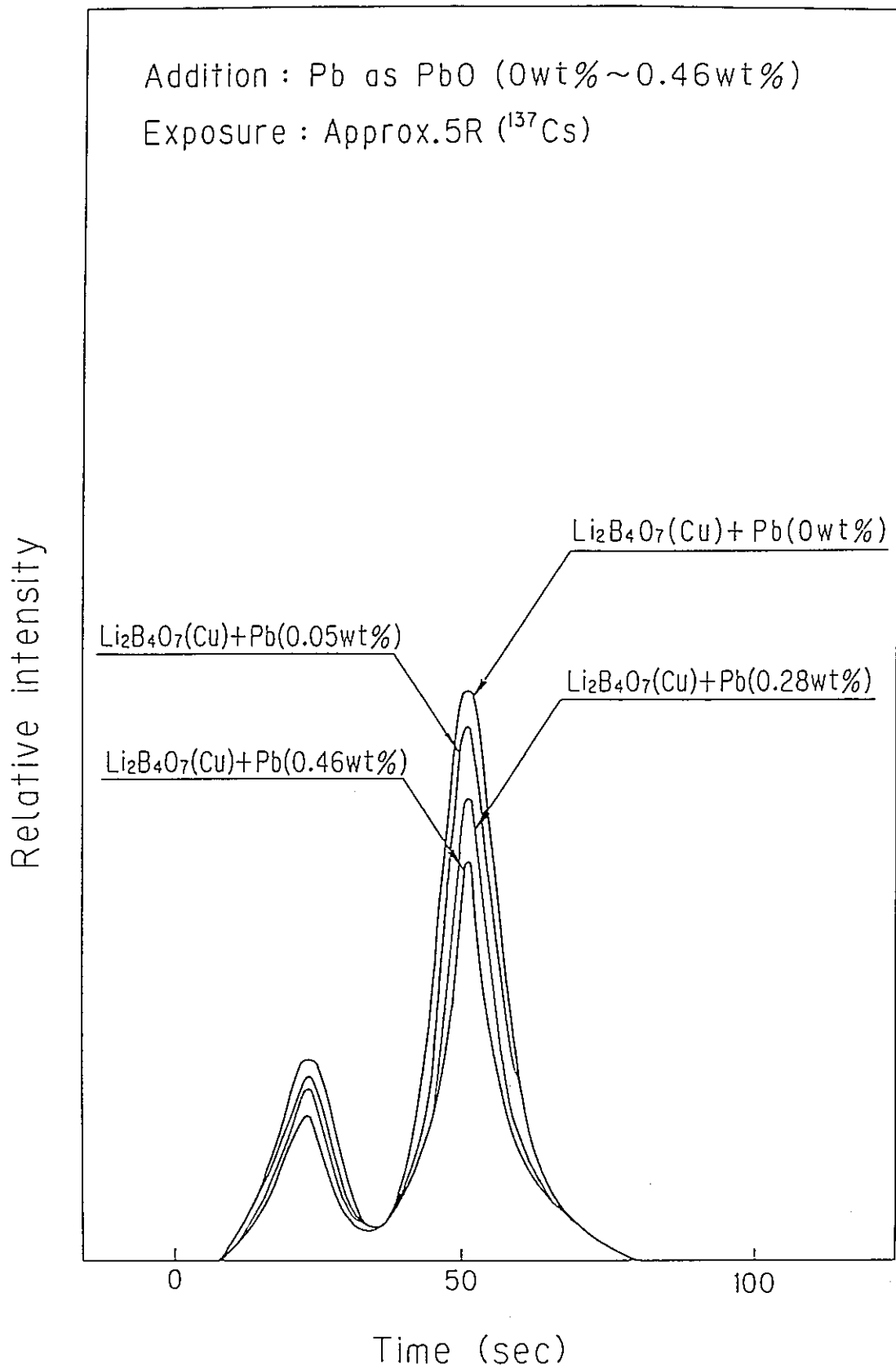


図 3 - 7 Pbの添加濃度を変化させた時のグロー曲線

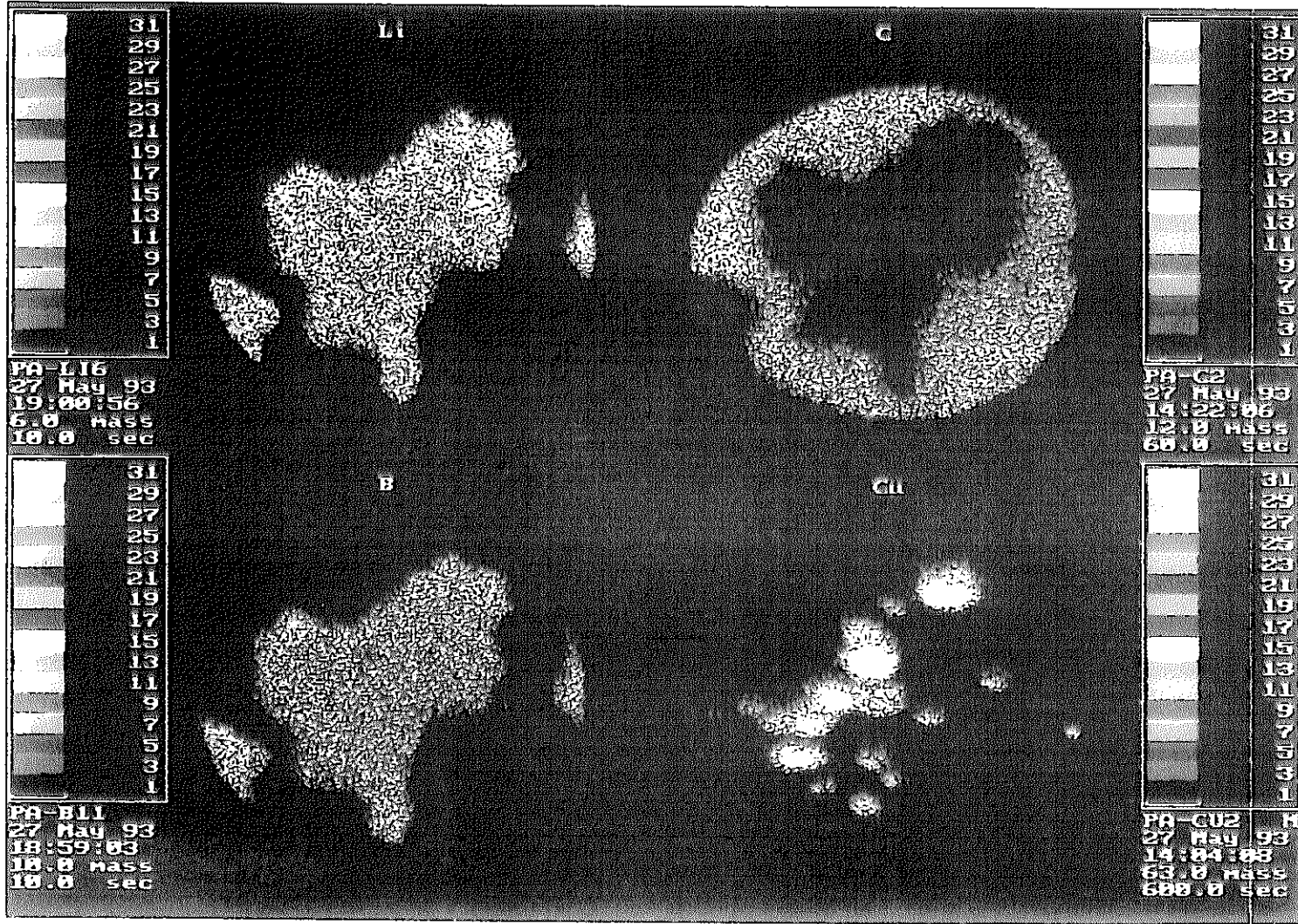


図3-8 2次イオン分析法による結晶中のCu、Pbの分布
(a) Cuの分布(例1)

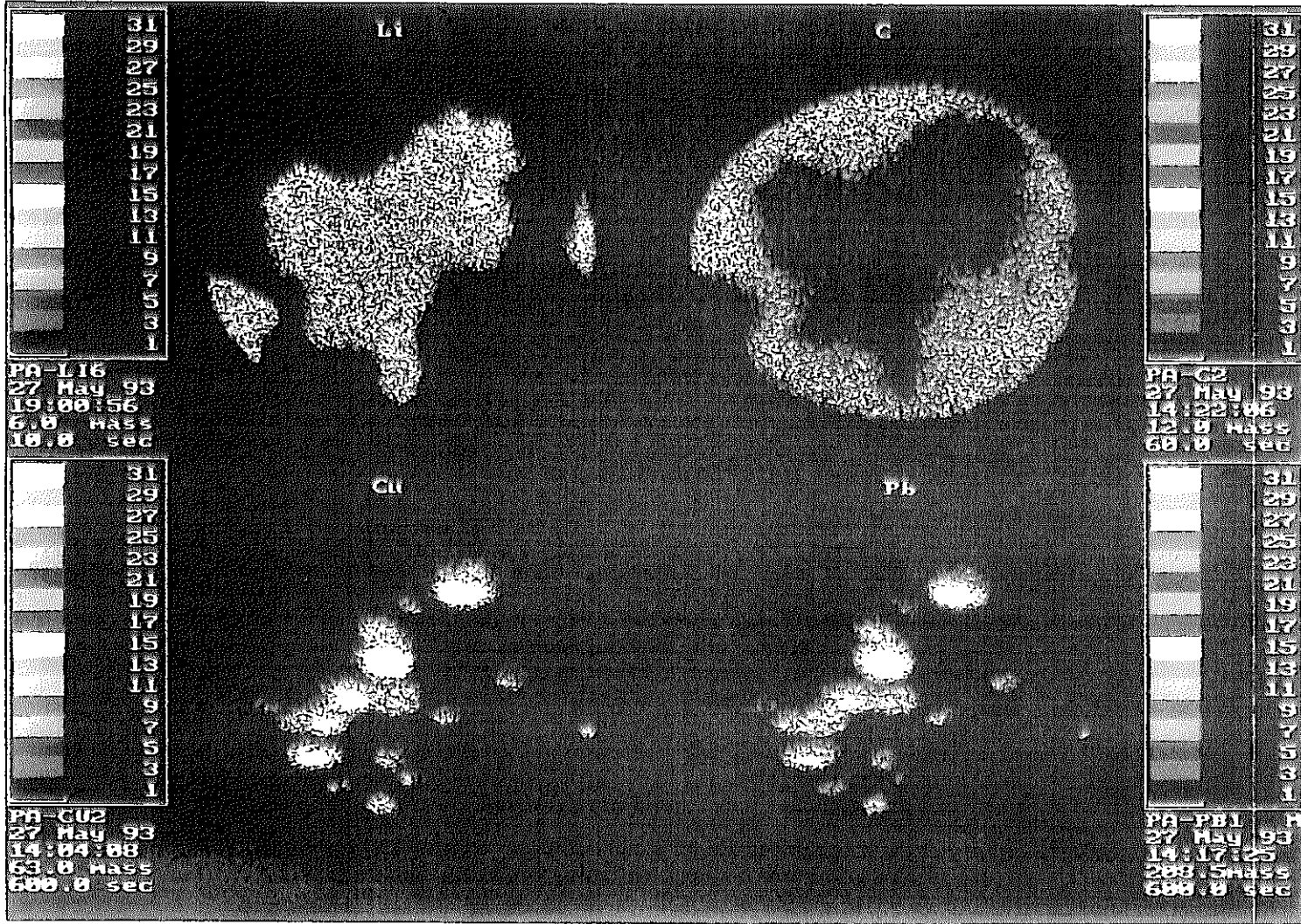


図3-8 (続き) (b) Pbの分布 (例1)

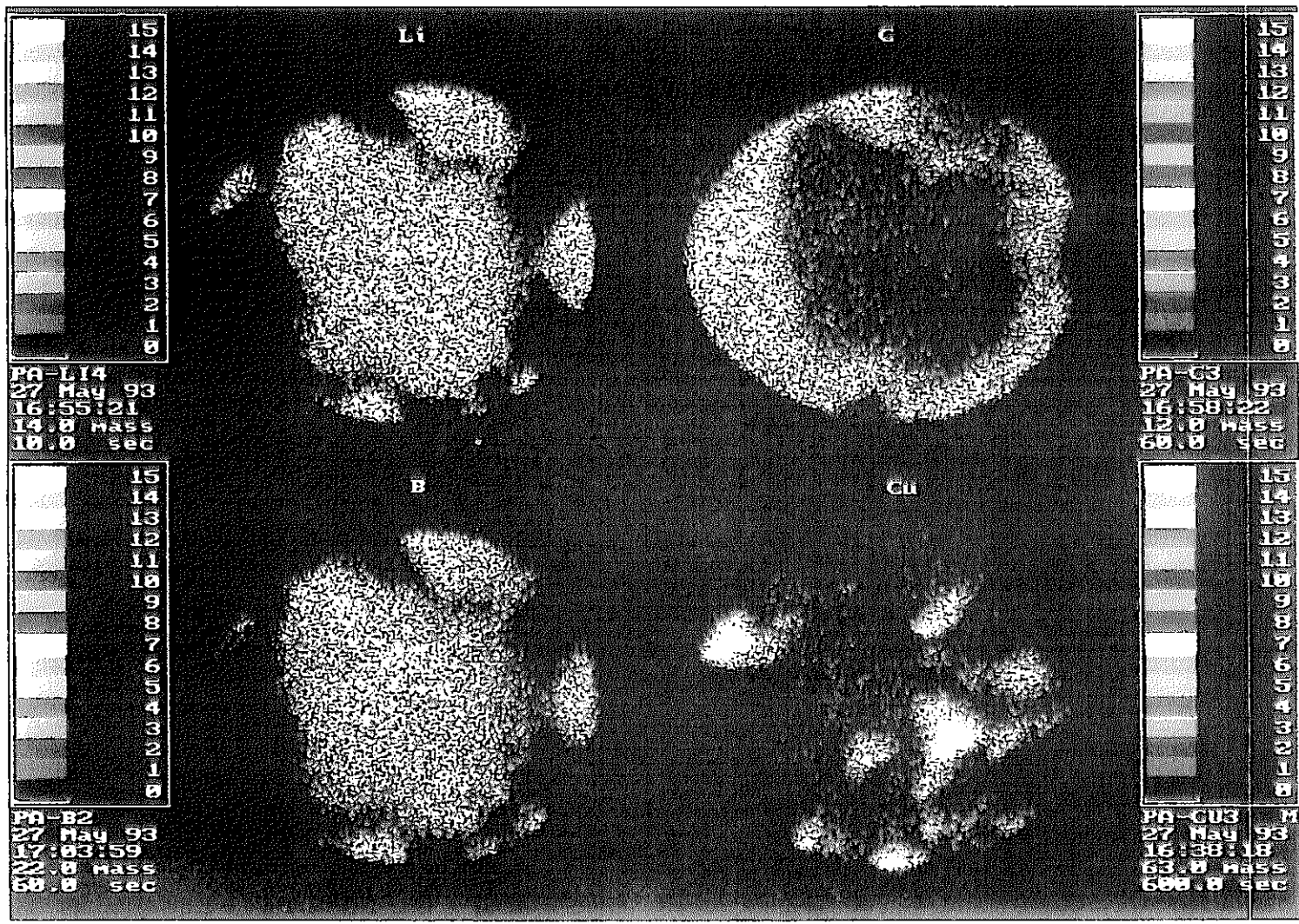


図3-8 (続き) (c) Cuの分布 (例2)

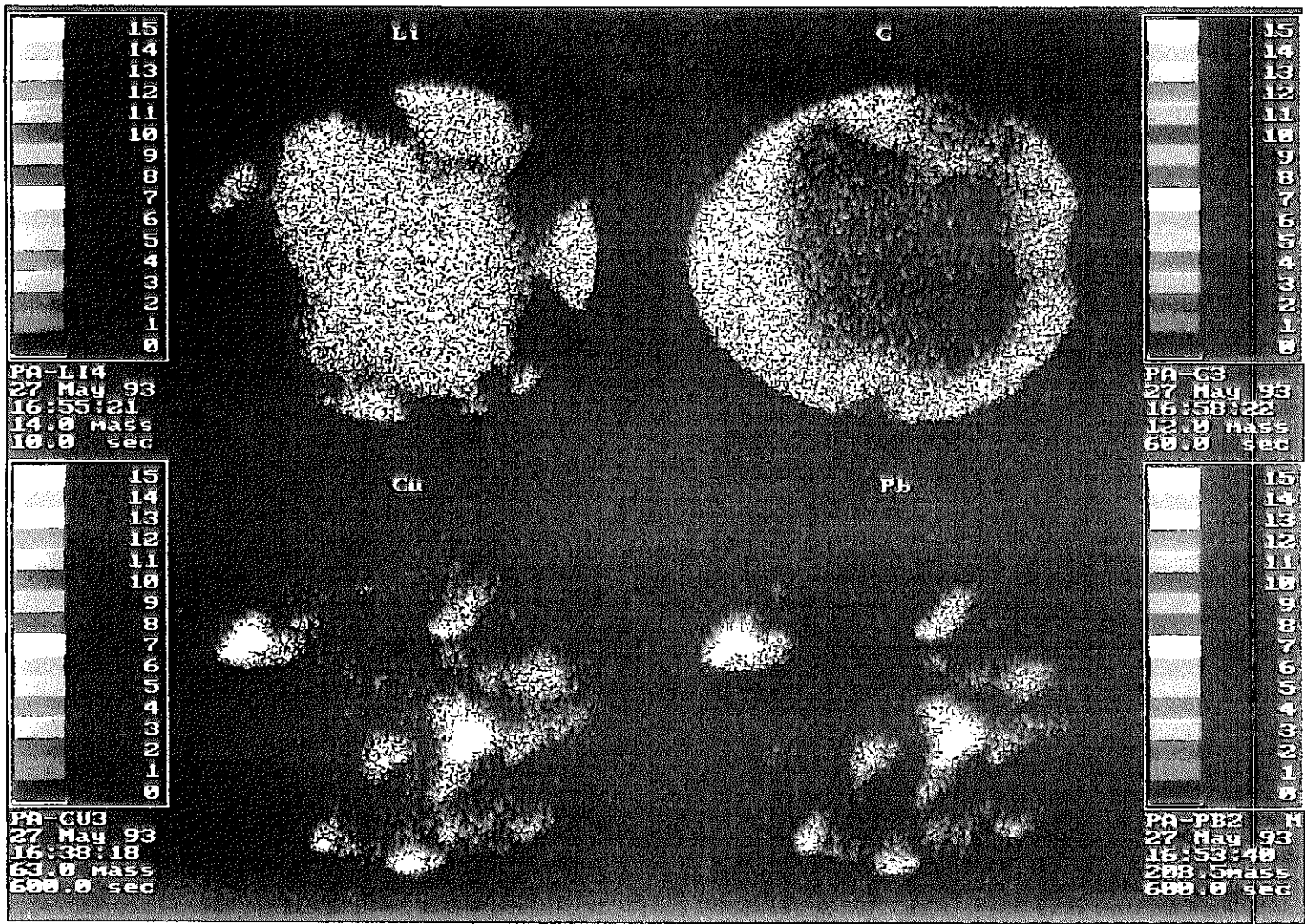


図3-8 (続き) (d) Pbの分布 (例2)

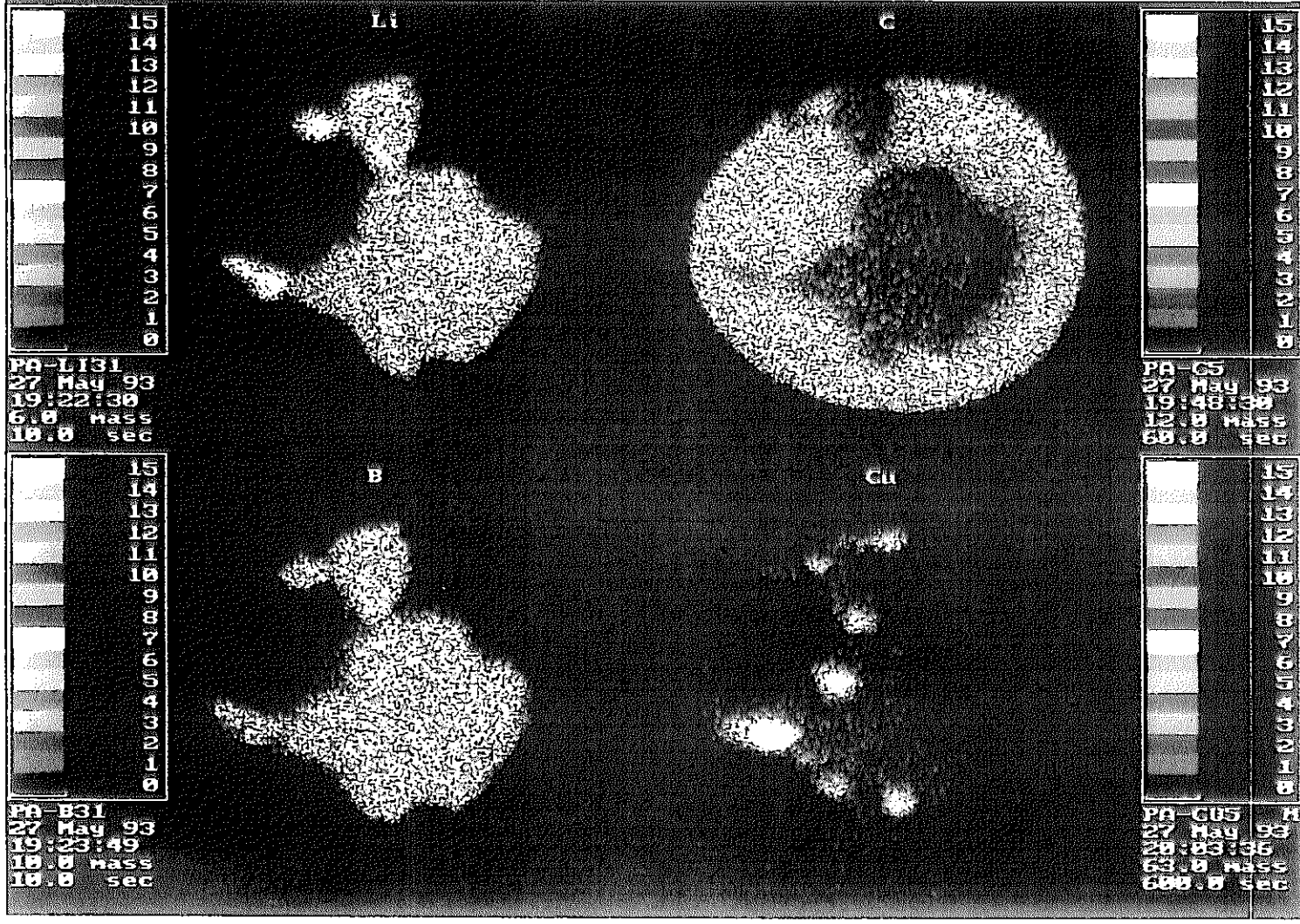


図3-8 (続き) (e) Cuの分布 (例3)

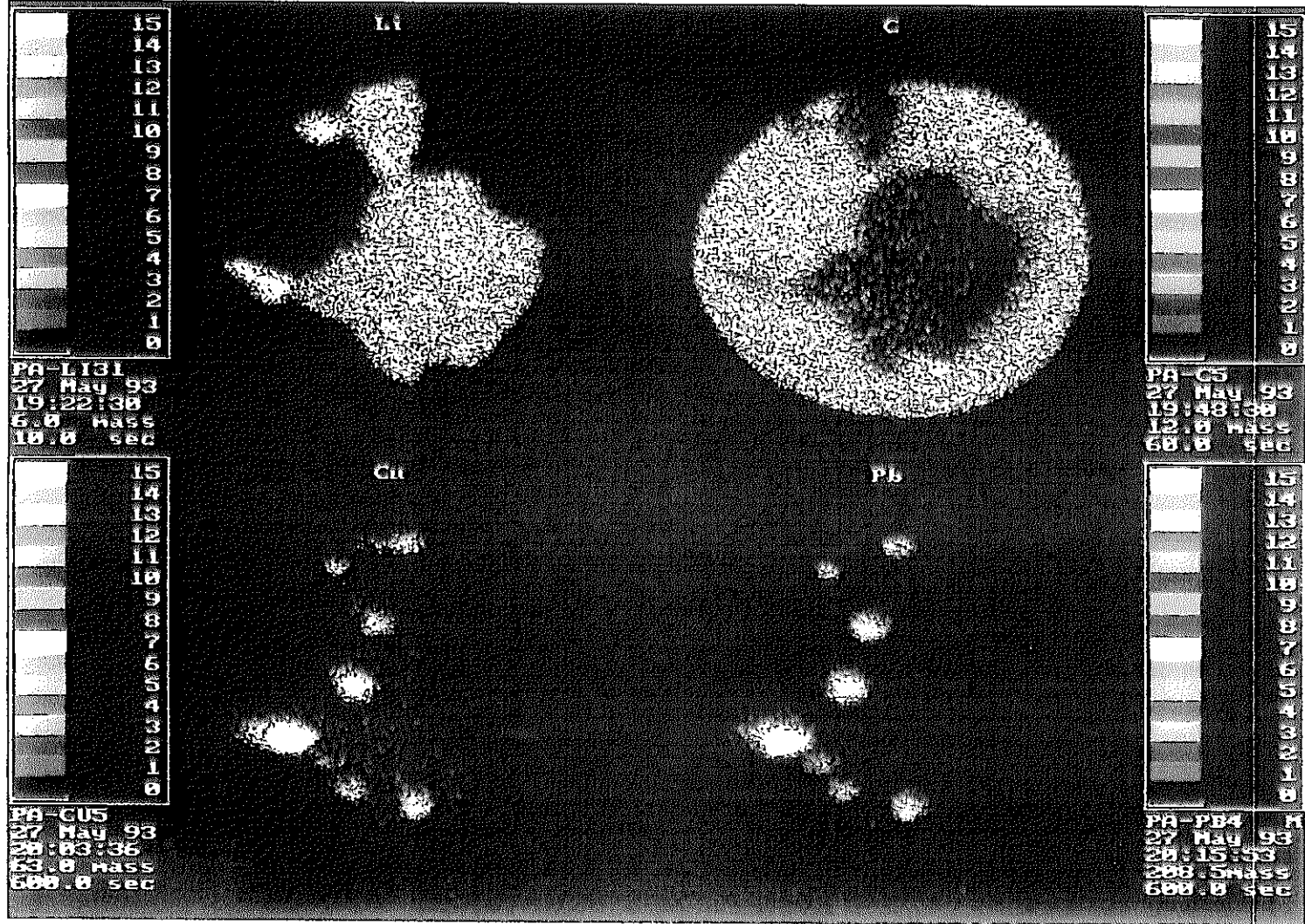


図 3 - 8 (続 き) (f) Pb の 分 布 (例 3)

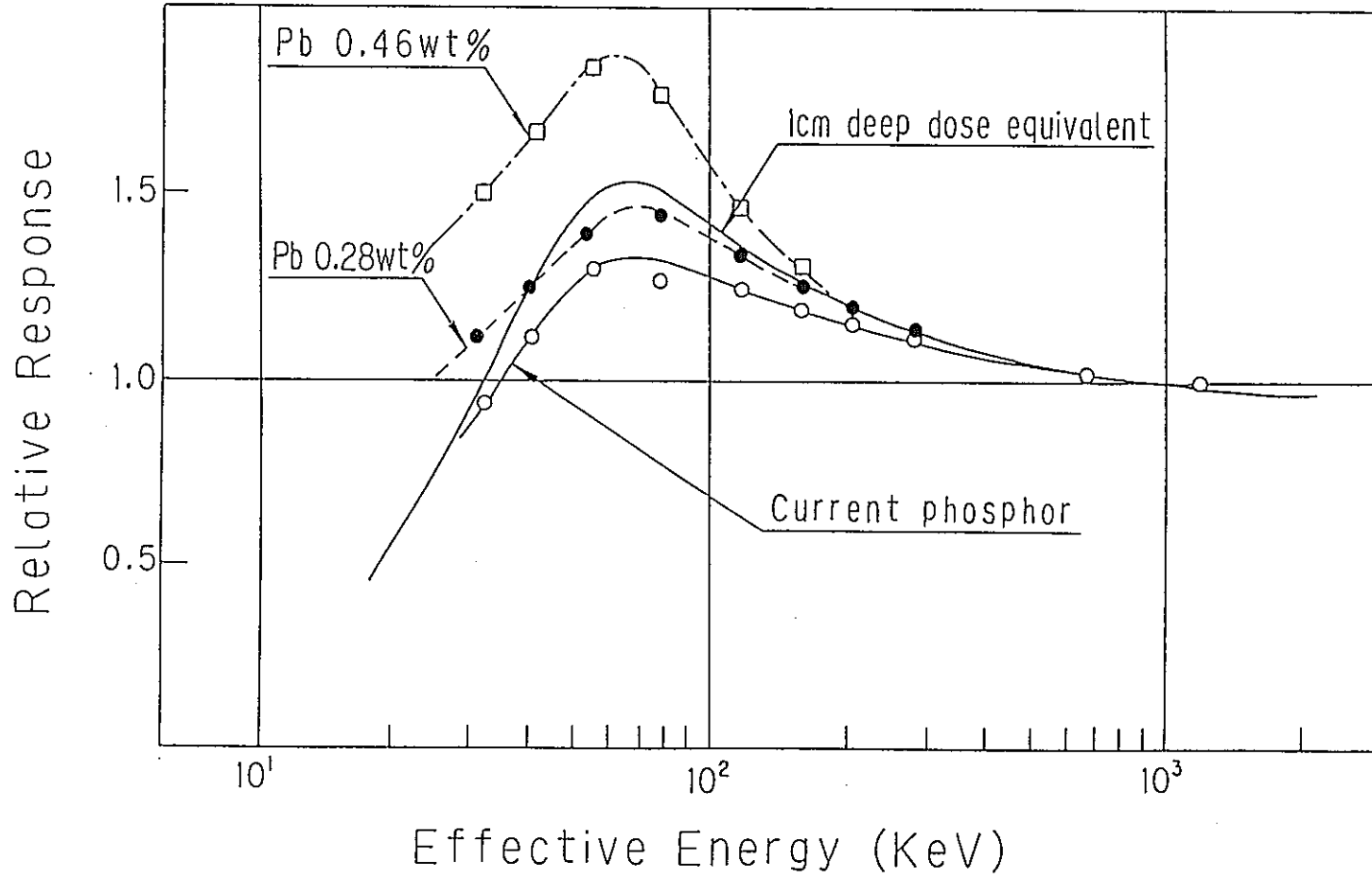


図3-9 Pbを微量添加した $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体の照射線量当たりの
 γ 線エネルギー応答特性
 現行の $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体及び γ 線 1cm線量当量換算係数との比較
 (PMMA製平板ファントムに装着)

第4章 高感度化に関する検討

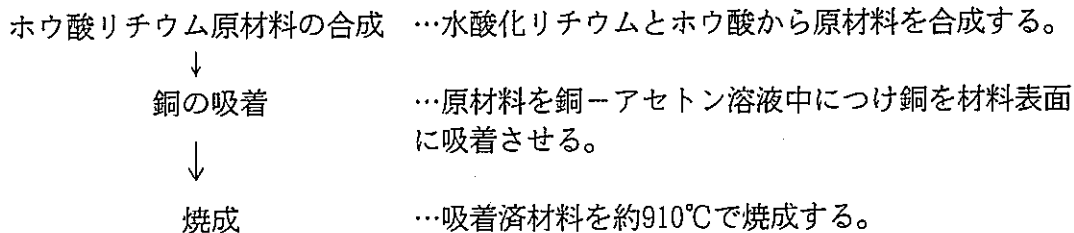
ここでは中性子線用素子の高感度化について述べる。(内容は一部 β/γ 線用素子の高感度化とも重複する。)

中性子線用TLD素子の感度を現行の4～5倍にすることを目標に、以下の3点について検討した。

- 1) ホウ酸リチウム蛍光体の発光効率の向上
- 2) リーダーの測定条件最適化によるシステム全体の感度向上
- 3) ホウ酸リチウム以外の蛍光体使用の可能性の検討

4-1 ホウ酸リチウム蛍光体の発光効率の向上に関する検討

ホウ酸リチウム蛍光体の主な製造工程を以下に示す。



これらの工程のうち、発光効率に影響を与えられとされる3点について検討した。

(1) 焼成条件の検討

焼成温度と発光効率との関係を調べた結果を図4-1に示す。焼成温度は融点よりも少し低い温度で発光効率が最大になる。また、焼成時間は発光効率には影響がない。

(2) LiとBの原子数比の検討

ホウ酸リチウム材料は、Li:B原子数の比率は平均して1:2の化学量論的組成になっている。結晶形としては理論的には Li_2O と B_2O_3 が1:2で共晶体を形成しているが、実際には様々な化学形の化合物からなる。ここではLiとBの比率を変化させた原材料を合成し、そのグロー曲線を調べた。

図4-2、4-3にそれぞれB、Li原子数割合を変えた場合のグロー曲線の変化、図4-4に主ピーク部分の面積をB/Li原子数比の関数として示す。Li:B=1:2の原子数比に比べてB原子数が過剰な場合には、主ピークは少し高くなるが、それ以上にプリピークも大きくなる。

また、Li原子数が過剰の場合には主ピークは小さくなり、さらに高温部に新たなピークが現れる。プリピークはフェーディングの、高温部のピークは残線量が大きくなる原因になるため、Li:B=1:2の割合はむしろ変えるべきではないという結論が得られた。

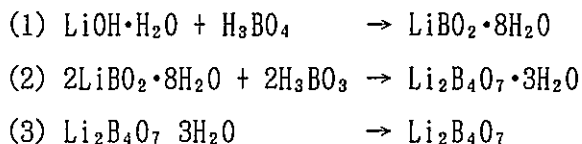
(3) 蛍光体結晶生成法の検討

結晶の生成方法を検討するため、現在の結晶について走査顕微鏡写真による結晶表面状態及び2次イオン質量分析による蛍光体断面状態を調べた。

図4-5(a)~(c)にそれぞれLi₂B₄O₇原材料、Li₂B₄O₇(Cu) (焼成後)、PbOを加えたLi₂B₄O₇(Cu) (焼成後)の走査型電子顕微鏡写真を示す。倍率は100~10000倍である。Li₂B₄O₇ (原材料)は針状及び四角錐状の小さな結晶が集まった多結晶であり、その直径は一個当たり約300μmである。これにさらに銅を吸着させ焼成すると直径100μm程度になる。

また、図3-8に示したように2次イオン質量分析による断面分析の結果から、活性体である銅原子は結晶中に均一分布していないことが判明している。おそらく微結晶の境界断面に集中して分布していると考えられるが、これを均一に分布させ、銅が捕獲される格子欠陥をより多く生成させれば発光効率はかなり大きくなると予想される。そこで結晶の生成条件の検討を行った。

原材料からLi₂B₄O₇を合成する工程は以下の通りである。



(1)の工程は主に不純物を取り除くための工程であり、天然組成の⁶Li、¹⁰Bを原材料とする場合は原料の純度が高いため必要ない。しかし、濃縮した⁶Li、¹⁰Bの合成材料のうち6LiOH・H₂Oは不純物が多く(表4-1参照)、特に蛍光体の発光効率を低下させるにFe、Crなどが含まれている。そこで(1)の工程の前にさらに不純物を除去する工程を新たに加えた。

次に(2)は結晶生成で最も重要な工程であり、ここで結晶が生成される。この工程は従来温度コントロールされずに行われてきたが、今回温度を厳密に制御し結晶性の良い蛍光体の生成する方法を検討した。これまでの結果からは、従来の蛍光体に比べて約2倍程度感度の高いものが得られている。図4-6に改良型蛍光体のグロー曲線を示す。現行の蛍光体のグロー曲線と比較して、プリピーク部分の面積は変わらず、主ピーク部分の面積は2倍程度となった。

表 4 - 1 ${}^6\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 原材料の化学分析表

| 元素名 | [ppm] | 元素名 | [ppm] | 元素名 | [ppm] |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| Al | 1 | Hg | 6 | S | <1 |
| Ag | <0.3 | Ho | <0.6 | Sb | 3 |
| Au | <0.8 | I | <0.5 | Sc | <0.2 |
| B | 0.9 | In | <0.5 | Se | <0.8 |
| Ba | 9 | Ir | <0.4 | Si | 3 |
| Bl | 0.3 | La | <0.2 | Sm | 0.8 |
| Br | 0.8 | Lu | <0.2 | Sn | 2 |
| Cd | <3 | Mg | <1 | Sr | 2 |
| Ce | <0.2 | Mn | 3 | Ta | <9 |
| Cl | 9 | Mo | 2 | Tb | <0.2 |
| Co | <0.05 | Nb | 2 | Te | 28 |
| Cr | 10 | Nd | 3 | Th | 0.3 |
| Cs | <0.5 | Ni | 37 | Ti | <0.03 |
| Cu | 4 | Os | <0.8 | Tl | <1 |
| Dy | 1 | P | <0.2 | Tm | <0.2 |
| Er | <0.8 | Pb | 6 | U | 1 |
| Eu | <0.4 | Pr | <0.2 | V | <0.07 |
| F | 0.8 | Pt | <2 | W | 10 |
| Fe | 33 | Rb | <1 | Y | <0.4 |
| Ga | <0.4 | Re | <1 | Yb | <0.7 |
| Cd | <3 | Rh | <0.1 | Zn | 30 |
| Ge | <0.3 | Ru | <0.4 | Zr | 0.8 |
| Hf | <1 | | | | |

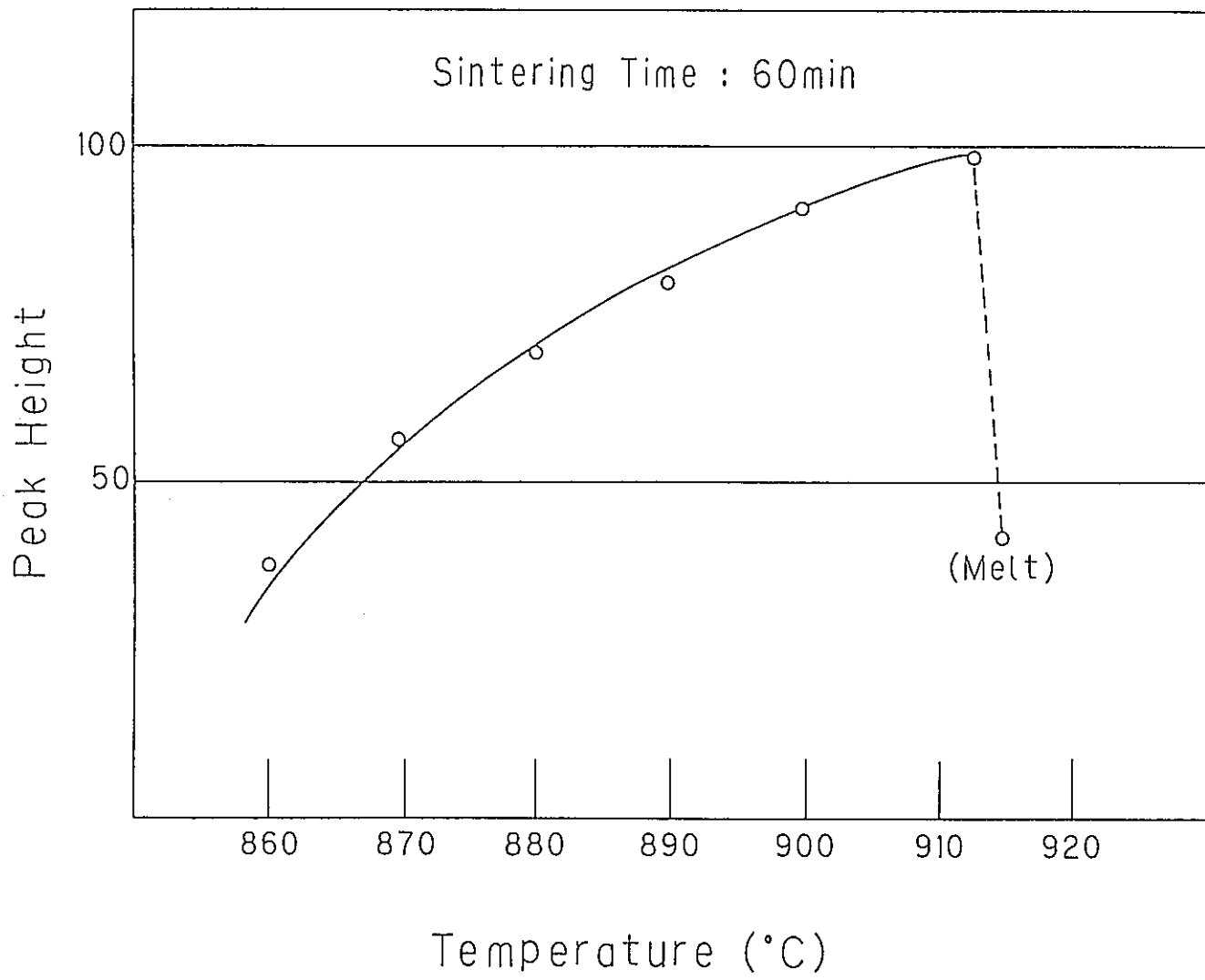


図4-1 ホウ酸リチウム蛍光体の焼成温度と発光効率の関係

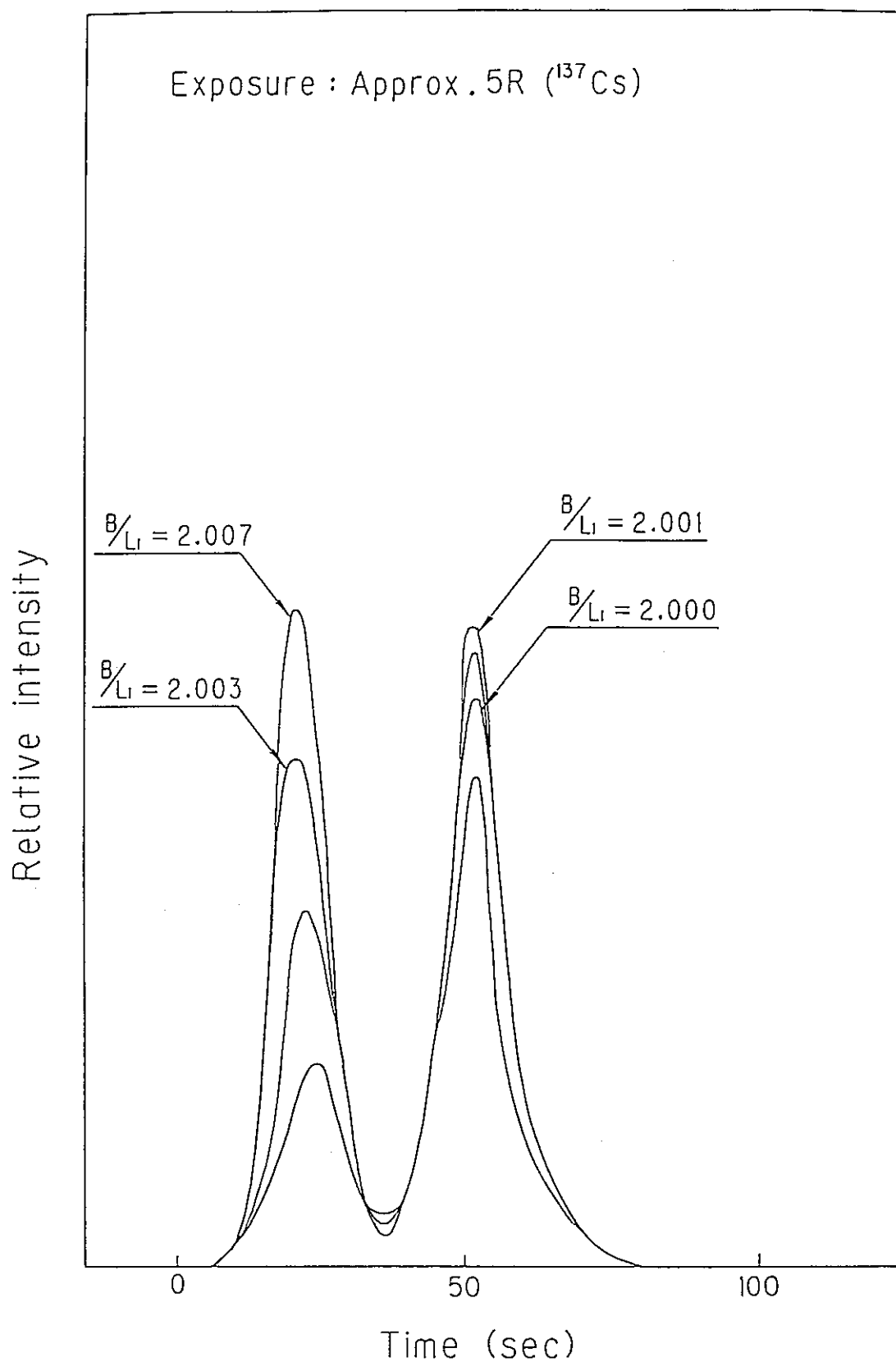


図4-2 B原子数割合を増やした場合のホウ酸リチウム蛍光体のグロー曲線の変化

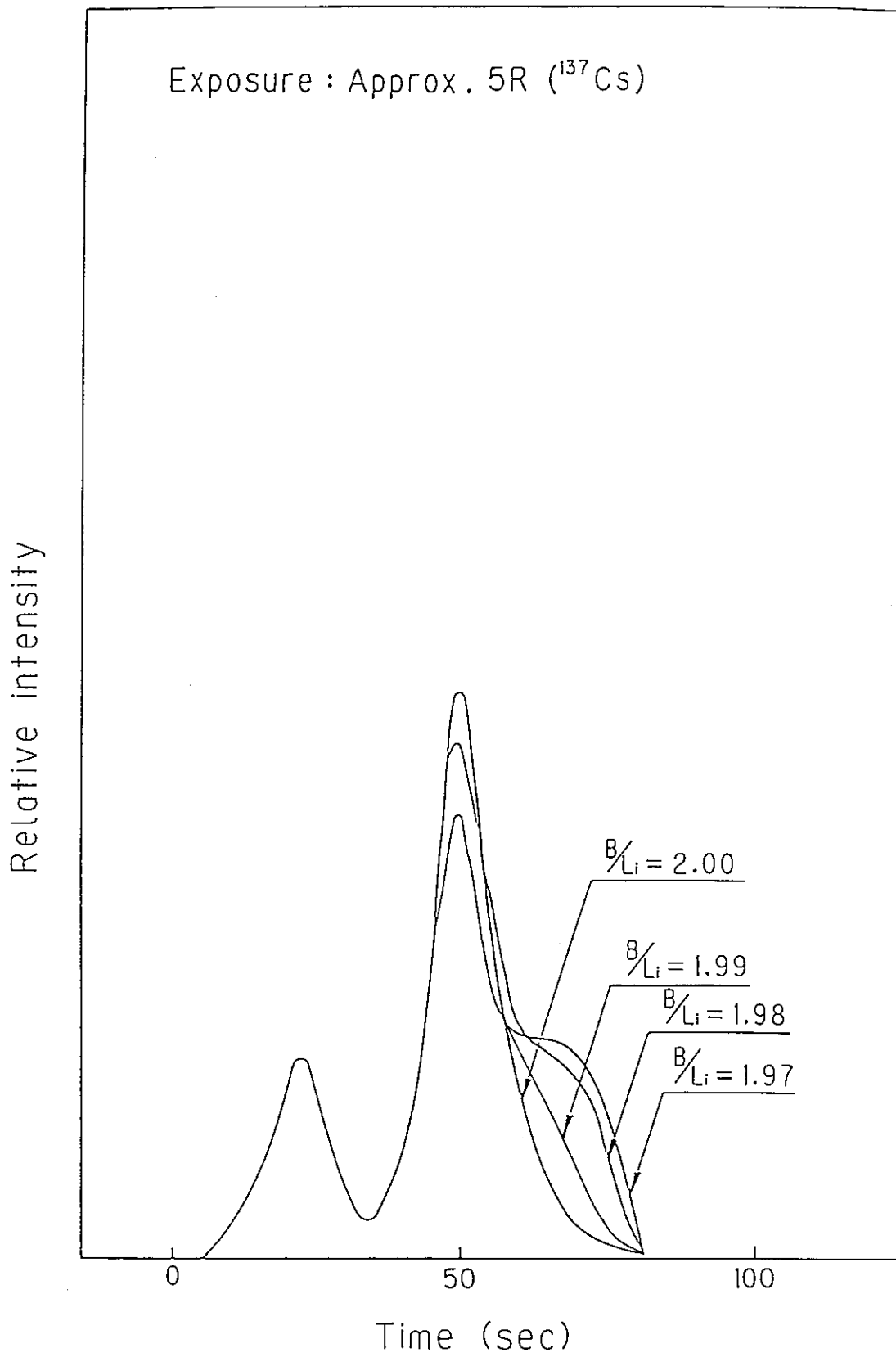


図 4 - 3 Li原子数割合を増やした場合のホウ酸リチウム蛍光体のグロー曲線の変化

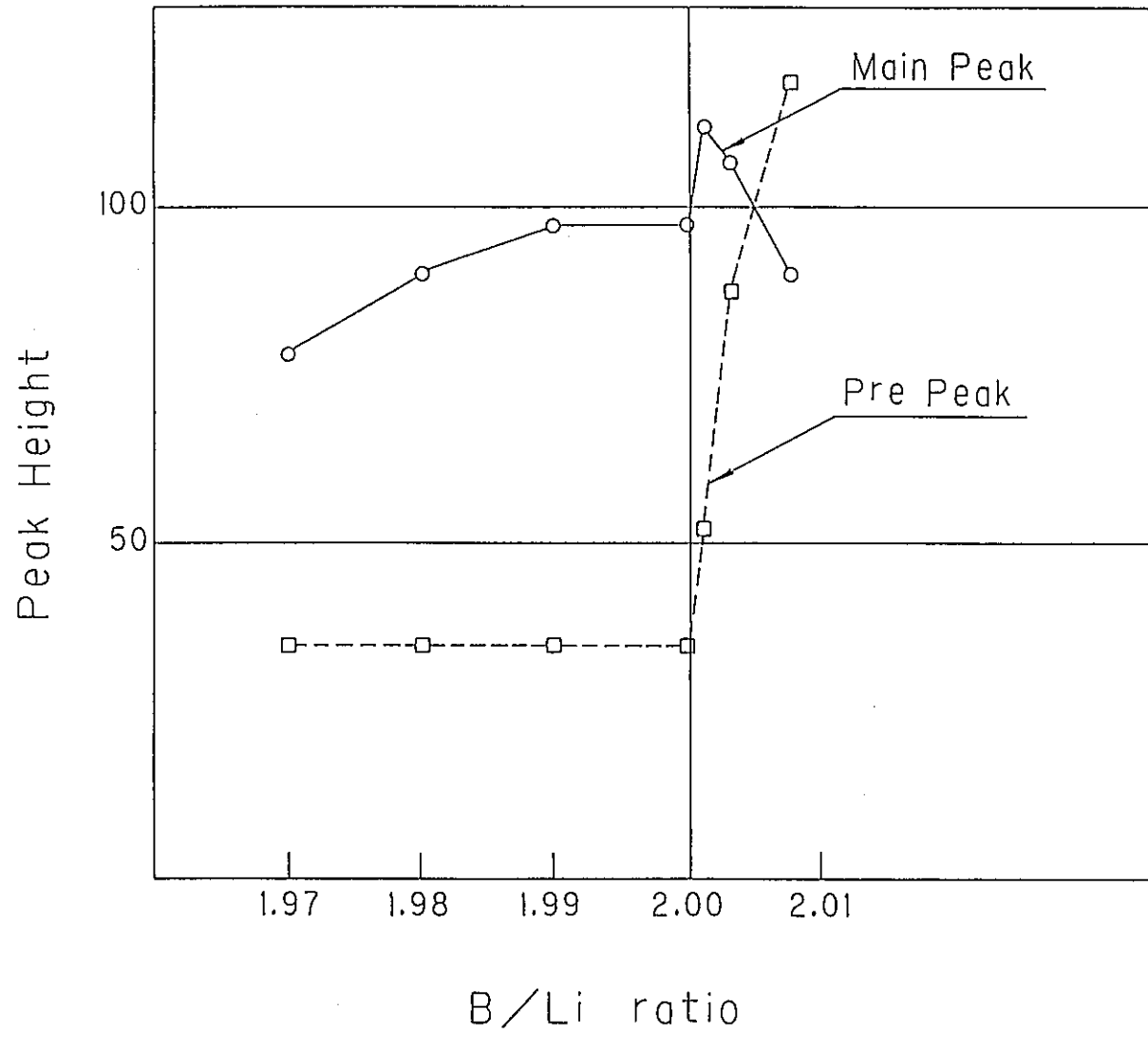
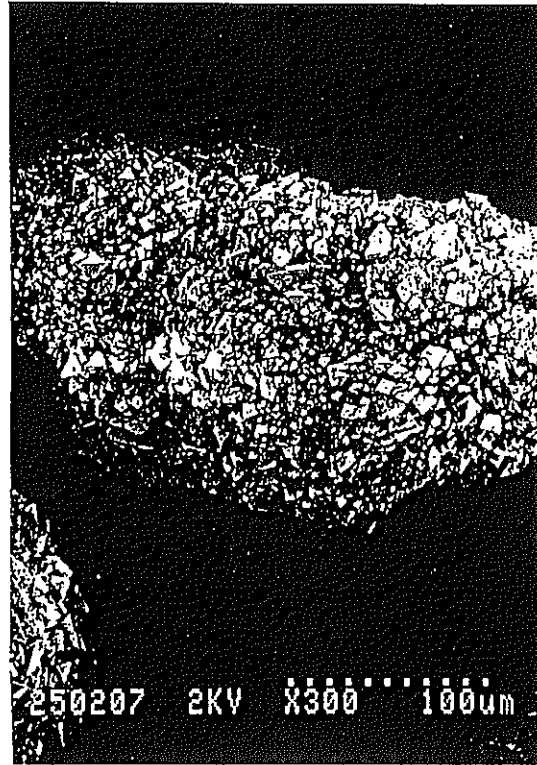


図4-4 B/Li原子数比とピーク発光効率の関係



X100



X300



X1000

図 4 - 5 (a) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 試料の電子顕微鏡写真

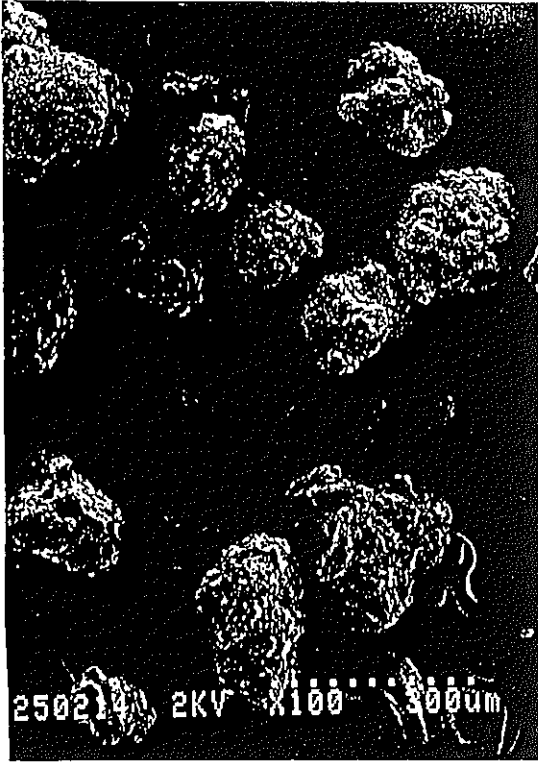


X3000

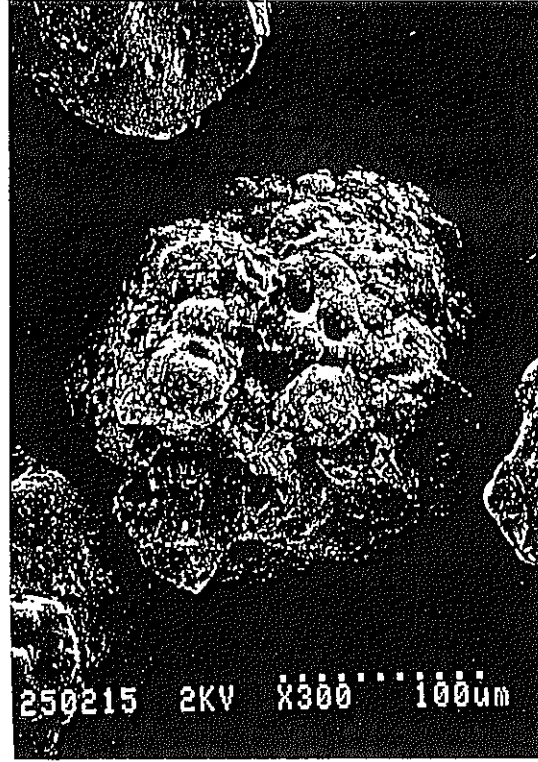


X10000

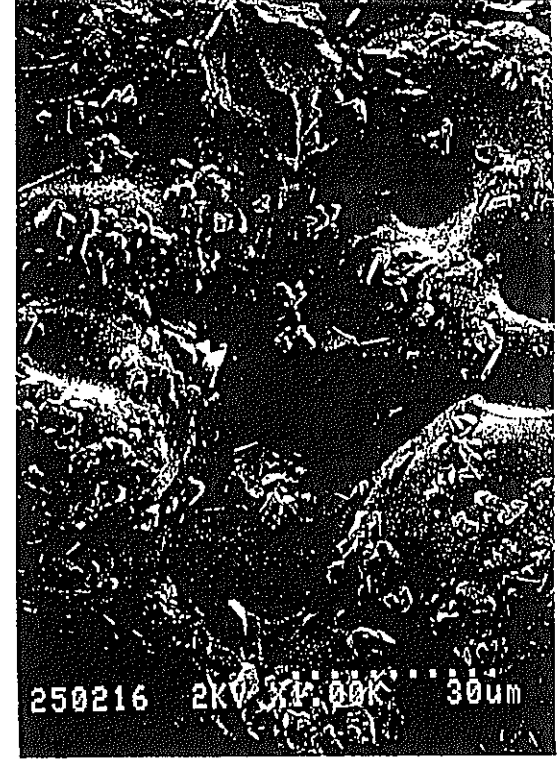
図4-5(a) (続き)



X100



X300



X1000

図4-5(b) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7+\text{Cu}$ 焼成後の電子顕微鏡写真



X3000

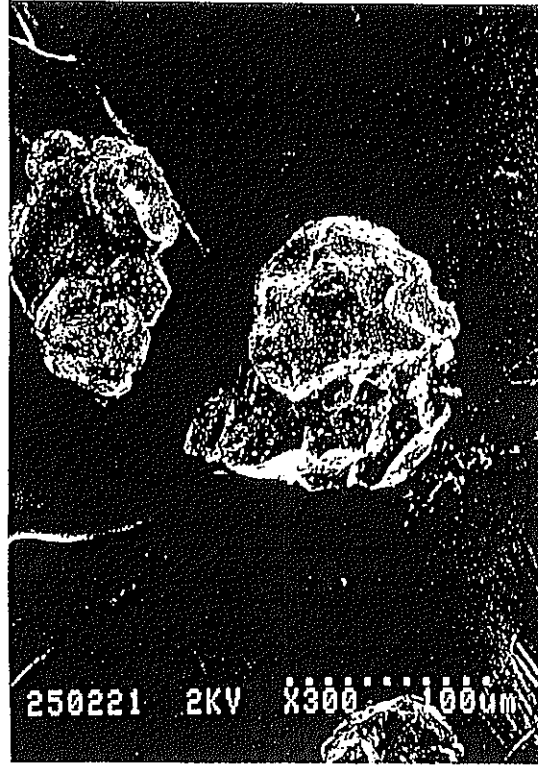


X10000

図 4 - 5 (b) (続き)



X100



X300

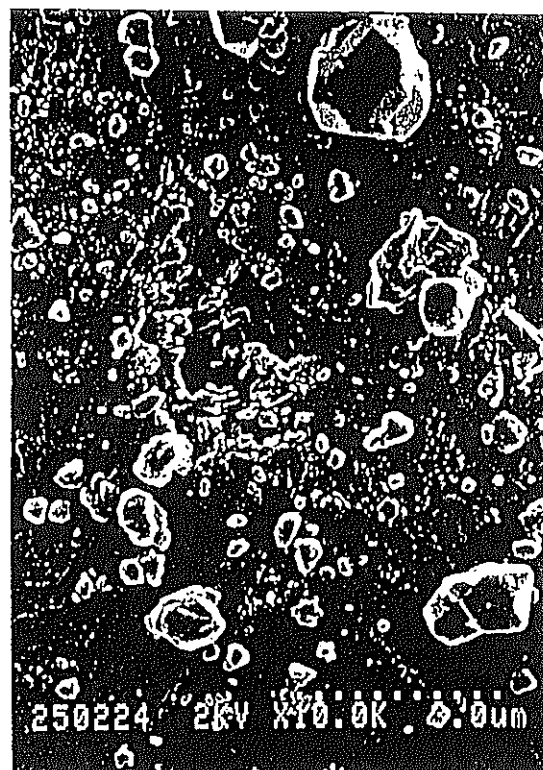


X1000

図4-5(c) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{Cu} + \text{PbO}$ 焼成後の電子顕微鏡写真



X3000



X10000

図4-5(c) (続き)

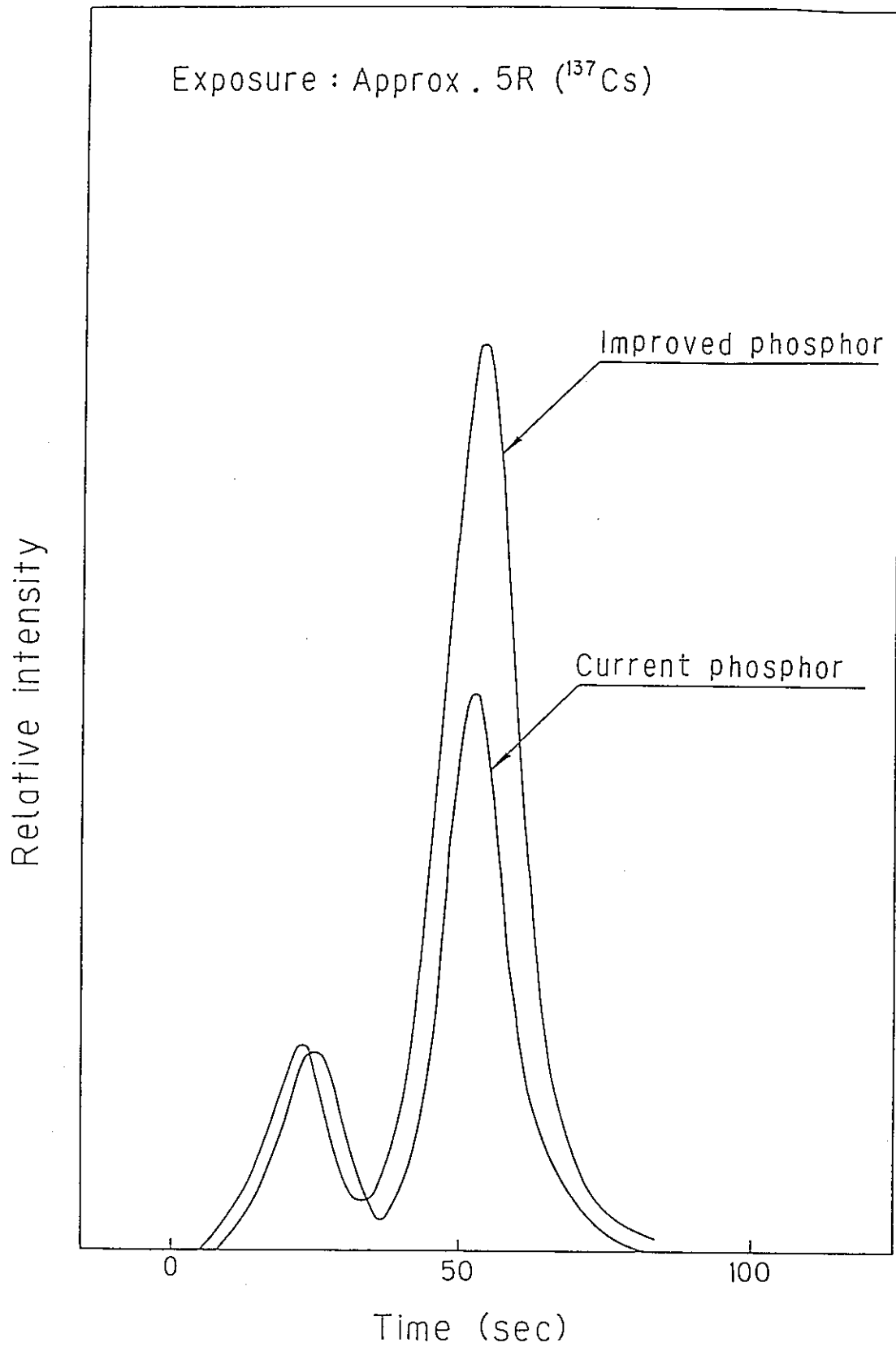


図4-6 改良型 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体のグロー曲線

4-2 リーダー読取り条件の最適化に関する検討

(1) リーダー光学系の概要

現行のリーダーシステムで蛍光体から放出された熱蛍光が光電子増倍管に入るまでの流れを簡単に説明する。

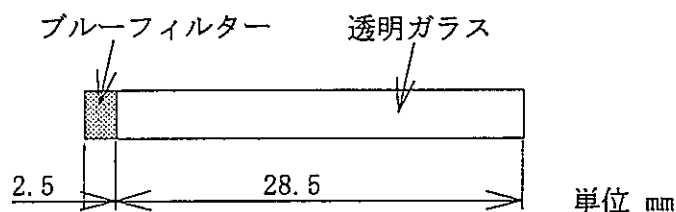
まず加熱された蛍光体から生じる熱蛍光の波長は硫酸カルシウムとホウ酸リチウムでは異なる。図4-7、4-8にそれぞれホウ酸リチウムと硫酸カルシウムの発光スペクトルを示すが、前者は368nmに単一ピークを、後者は364、452nmの2つのピークを持っている。これらの光は光電子増倍管前面の長さ約3cmのライトガイド光電子増倍管に入射する。ライトガイドの光電子増倍管側には厚さ約2.5mmのブルーフィルターが装着されており、これは青色の光を選択的に取入れ、熱輻射によるノイズ成分と熱蛍光による信号成分を分離し、S/N比を向上させる機能を持つ。

ブルーフィルターの透過特性を図4-9に示す。このフィルターの場合500nm以上の可視光線をほとんど遮り、約300～500nmの光を選択的に透過する。次に光電子増倍管の分光特性を図4-11に示す。波長300～700nmの光に対して高い感度を持ち、それ以外についてはほとんど感度を持たない。

本節では、光電子増倍管の分光特性に最も合致するフィルターの検討を行った。

(2) ブルーフィルターの検討

現行のライトガイドの構造を下に示す。



全長31mmの内、2.5mmがブルーフィルターである。ここでは、このブルーフィルターの厚みを0.5、1.0、1.5、2.0、2.5mmと変化させた時のCAL値、TLDの熱蛍光の測定値（以下、読取り値）、ゼロ点線量の変化を調べた。CAL値は内蔵光源による発光の測定値であり、リーダー光学系の校正などに用いる。また、ゼロ点線量は、未照射のTLDを測定した場合の熱蛍光による信号以外の成分であり、いわゆるゼロ点に相当する。

表4-2、図4-12にCAL値の変化を調べた結果を示す。ブルーフィルターの厚みを現行の1/5にすることでCAL値は約6倍になる。

表 4-2 ブルーフィルターの厚さ変化に伴うCAL値の変化

| フィルター厚さ[mm] | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CAL読取り値[mR eq.] | 60200 | 42500 | 18600 | 15100 | 10100 |
| 比(現行を1とする) | 5.96 | 4.21 | 1.85 | 1.50 | 1.00 |

^{137}Cs の γ 線を約172mR 照射した場合のホウ酸リチウム蛍光体と硫酸カルシウム蛍光体の読取り値の変化を表 4-3、図 4-13(a)(b) に示す。フィルターの厚みを薄くすることでリーダーの検出効率も増加し、1/5の厚さではほぼ3倍の検出効率になる。ここでホウ酸リチウムと硫酸カルシウムで発光効率の変化の度合いに差が無いのは、現行のフィルターの光透過特性が両蛍光体の発光波長と良く一致しているためである。

表 4-4、図 4-14に示すのはフィルター厚さの変化に伴うホウ酸リチウム蛍光体のゼロ点線量の変化である。フィルターの厚みを現行の1/5にすればゼロ点線量は約5倍となり、熱蛍光成分の読取り値の増え方よりも大きい。今回の実験で得られたゼロ点線量の値が小さく、誤差が大きいため判断は難しいが、熱輻射ノイズによるゼロ点線量の増え方は熱蛍光成分の読取り値の増え方よりも多いと考えられるため、現行フィルターを薄くすることでリーダーの検出効率は向上するが S/N比はやや悪化すると見られる。

表 4-3 ブルーフィルターの厚さ変化に伴う読取り値の変化(照射線量 172mR)

| フィルター厚さ[mm] | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|---|------|------|------|------|------|
| $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ [mR eq.] | 703 | 637 | 360 | 348 | 232 |
| 比(現行を1とする) | 3.03 | 2.75 | 1.55 | 1.50 | 1.00 |
| $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ [mR eq.] | 667 | 598 | 345 | 300 | 212 |
| 比(現行を1とする) | 3.15 | 2.82 | 1.63 | 1.42 | 1.00 |

表 4-4 ブルーフィルターの厚さ変化に伴うホウ酸リチウムのゼロ点線量の変化

| フィルター厚さ[mm] | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| ゼロ点線量[mR eq.] | 32 | 24 | 18 | 10 | 6.5 |
| 比(現行を1とする) | 4.9 | 3.7 | 2.8 | 1.5 | 1.0 |

次にブルーフィルターの厚さを0.5mm（表4-3の結果からリーダー検出効率が3倍になる）の状態ではホウ酸リチウム蛍光体の読取り値の再現性試験を行った。照射線量は約100 mRであり、総TLD数20個（バッジ数5×素子数4）について照射・測定を5回繰り返して行った。その結果を表4-5に示す。5回の再現性試験で百分率標準偏差は平均で2.2%であり、現行のホウ酸リチウム蛍光体の再現性約5%と比べて格段に改善されており、これはリーダーの検出効率増加によって統計誤差が減少したためである。

（3）他のフィルターの検討

現行のブルーフィルターとは透過波長の異なるフィルターを使用してその特性変化を調べた。

使用した各種フィルターの透過特性を図4-9、4-10に示す。サンプル1は透過波長領域が現行品よりも短波長側にシフトしたものの、サンプル2はより透過波長の領域が広いもの、サンプル3はほとんどの可視光を透過するが長い波長の光をほとんど遮る熱吸収フィルターである。

ここでは、サンプルフィルターの厚さを0.5mmに固定し、現行ブルーフィルターとの検出効率やゼロ点線量の違いを調べた。

表4-6はサンプル1、2と現行フィルターでのホウ酸リチウム蛍光体の検出効率、ゼロ点線量、CAL値の変化を比較した結果である。サンプル1では現行フィルターに比べてCAL値が大幅に小さくなっているのに対して、ホウ酸リチウム蛍光体の読取り値はほとんど変化していない。これは内蔵光源の発光波長がホウ酸リチウム蛍光体の発光波長とずれていることを示している。より透過波長領域の広いサンプル2の結果と合せて考えると、内蔵光源の発光波長はホウ酸リチウムに比べて長波長側にあると考えられる。

表4-6 サンプルフィルター（1、2）でのホウ酸リチウム素子の読取り特性の変化

| 項目 | サンプル1 | サンプル2 | 現行フィルター |
|---|-------|-------|---------|
| CAL値[mR eq] | 18000 | 53200 | 38700 |
| (現行との比) | 0.47 | 1.37 | 1.00 |
| Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)[mR eq] | 216.8 | 239.1 | 213.2 |
| (現行との比) | 1.02 | 1.12 | 1.00 |
| ゼロ点線量[mR eq] | 1.53 | 6.71 | 3.96 |
| (現行との比) | 0.39 | 1.69 | 1.00 |

また、熱輻射ノイズによるゼロ点線量の値もCAL 値と同様の傾向を示しており、ゼロ点線量の発光波長も内蔵光源とほぼ同じような波長と考えられる。この結果からはホウ酸リチウム蛍光体に関してはサンプル1が最も良いS/N 比を与え、ゼロ点線量も現行フィルターの40%に減少する。

次に熱輻射線量をさらに減らすためにサンプル3（熱吸収フィルター）とサンプル1、2及び現行ブルーフィルターとの組み合わせで試験を行った。組み合わせは以下の3通りである。

- 組み合わせ(A) サンプル3 0.5mm + サンプル1 0.5mm
 (B) サンプル3 0.5mm + サンプル2 0.5mm
 (C) サンプル3 0.5mm + 現行ブルーフィルター 0.5mm

試験結果を表4-7に示す。現行フィルターにサンプル3の熱吸収フィルターを付けた場合と付けない場合とでは特性の違いはほとんどない。一方、サンプル1のフィルターを使用した場合には、ゼロ点線量は大幅に小さくなる。

以上の検討から、ホウ酸リチウム系素子に関してはサンプル1のフィルターが最もS/N 比が良いことがわかった。

表4-7 組合せフィルターでのホウ酸リチウム蛍光田井の読取り特性の変化

| 項目 | (A) | (B) | (C) | 現行フィルター |
|---|-------|-------|-------|---------|
| CAL値[mR eq] | 17000 | 49500 | 40000 | 38700 |
| (現行との比) | 0.44 | 1.28 | 1.03 | 1.00 |
| Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)[mR eq] | 200.6 | 215.7 | 216.5 | 213.2 |
| (現行との比) | 0.94 | 1.01 | 1.02 | 1.00 |
| ゼロ点線量[mR eq] | 1.55 | 6.08 | 4.16 | 3.96 |
| (現行との比) | 0.39 | 1.54 | 1.05 | 1.00 |

次に、このサンプル1のフィルターを用いて硫酸カルシウムとホウ酸リチウム蛍光体の感度の比較試験を行った。UD-802線量計（ホウ酸リチウム、硫酸カルシウム蛍光体それぞれ2個ずつ、計4個）5個にγ線（¹³⁷Cs）172mRを照射し、リーダーで測定した。その結果を表4-8に示す。

硫酸カルシウム蛍光体の読取り感度が現行のリーダーに比べて約半分まで下がったが、これはサンプル1のフィルターの光透過特性が、ホウ酸リチウムの発光波長には良く合致するが、硫酸カルシウムの発光波長にはあまり合致しないためである。しかし、フィルター厚さを従来の2.5mmから0.5mmに薄くすることで検出効率そのものは約3倍にまで上がるので、実効的な感度は1.5倍となり実用上の問題はない。

表4-8 サンプルフィルター1を用いた場合の感度(照射線量 172mR)

| | # 1* | # 2* | # 3** | # 4** |
|-----------------|------|------|-------|-------|
| 平均読取り線量[mR eq.] | 238 | 234 | 124 | 134 |
| 相対偏差[%] | 2.1 | 3.2 | 4.3 | 6.1 |

* $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$, ** $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$

表4-9はサンプル1のフィルターを用いた場合の再現性試験の結果である。照射・測定条件は表4-8と同様だが、試験を10回繰り返し行った。ホウ酸リチウム、硫酸カルシウム蛍光体の再現性はそれぞれ2.4、1.8%と従来のものに比べてかなり改善されていることがわかる。

表4-9 サンプルフィルター1を用いた場合の再現性(照射線量 172mR)

| 素子No. | # 1* | # 2* | # 3** | # 4** |
|---------------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 169.7[mR eq.] 1.7[%] ⁺ | 162.6 2.2 | 180.7 1.0 | 207.5 2.0 |
| 2 | 176.8 2.6 | 177.3 2.1 | 202.9 1.1 | 207.6 2.6 |
| 3 | 166.0 4.4 | 168.8 2.4 | 195.9 1.1 | 213.2 4.3 |
| 4 | 171.5 2.3 | 165.9 1.4 | 196.9 1.0 | 216.8 1.4 |
| 5 | 165.3 2.2 | 174.2 2.9 | 201.5 1.5 | 220.1 1.5 |
| 再現性の平均 [%] | 2.4 | | 1.8 | |

* $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$, ** $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$, ⁺ 10回の読取り値のバラツキ(1 σ)

(4) リーダー光学系の検討結果のまとめ

リーダー光学系の検討結果を簡単にまとめる。

- (1) 現行ブルーフィルターでは薄くなるほど検出効率は高くなるが、ホウ酸リチウム系蛍光体の場合、S/N比は悪くなる。
- (2) 内蔵光源の発光波長は現行のフィルターの透過波長領域よりも長い波長の成分が多い。
- (3) 従来、熱輻射線量と言われていた成分の発光波長は、内蔵光源の波長領域と良く一致している。緑～黄色の発光と考えられる。

- (4) ホウ酸リチウムのS/N比が最大になるフィルターはサンプル1であり、フィルター厚さをこれまでの1/5にすれば、検出効率は約3倍になり、ノイズ成分はこれまでとほぼ同様にすることができる。
- (5) 上記フィルターを用いた場合、透過特性の観点からは硫酸カルシウムの検出効率は約半分になるが、フィルター厚さを薄くすることによって従来の厚さよりも3倍の検出効率が得られるので、結果的にリーダー読取り感度は1.5倍になる。

4-3 ホウ酸リチウム以外の蛍光体の検討

中性子線測定用のTLD材料として現在実用化されているものは、 ${}^6\text{LiF}$ と ${}^7\text{LiF}$ 及び ${}^6\text{Li-}^{10}\text{B}$ と ${}^7\text{Li-}^{11}\text{B}$ の組合わせがほとんどである。松下産業機器(株)ではホウ酸リチウム蛍光体以外では、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})+{}^6\text{LiF}$ と $\text{CaSO}_4(\text{Tm})+{}^7\text{LiF}$ を中性子線測定用TLD（それぞれ、UD-136N、UD-137N）として既に実用化しており、これをTLD バッジ用のTLDとして利用することを検討した。

UD-136Nは、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ と ${}^6\text{LiF}$ を重量比1:1で混合したものである。ここで ${}^6\text{LiF}$ は中性子との核反応によって荷電粒子を放出する役目を持ち、蛍光体としての機能はない。従って γ 線に対するエネルギー応答特性は $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ とほとんど同じであり、中性子線に対する感度はホウ酸リチウムに比べて約15倍高くなると予想される。

UD-136Nの場合、中性子線に対する感度と γ 線に対する感度が比例関係にあるのは、両者の重量比が45/55~55/45の範囲にある場合だけであり、従って、この混合材料を用いてTLD バッジ用の蛍光体を製作する際の問題点は、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ と ${}^6\text{LiF}$ の重量比が等しく保てるかどうかにある。

$\text{CaSO}_4(\text{Tm})+{}^6\text{LiF}$ 混合材料を用いて38個のTLD バッジを試作し、 ${}^{137}\text{Cs}$ γ 線(172mR)を照射してリーダーで測定した。この時リーダーは $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ の加熱条件で、かつホウ酸リチウム系のTLDとして読取りを行った。従って、読取り値は照射線量とは関係なく、相対的な感度の増加を表す。

表4-10に測定結果を示す。総数152個(=バッジ数38×TLD素子数4)の読取り値の平均は、1190mR、その相対偏差は23.8%であった。照射線量に対して約7倍のレスポンスが得られたが、これは当初の予想である15倍に比べてかなり小さい。この理由は、蛍光体にワニスを塗付し、焼成した後の蛍光体面の色が茶褐色であり(これはLi系の特徴)、蛍光体からの発光を吸収するためと考えられる。また、バラツキが通常のTLD バッジ用素子のバラツキ約10%に比べて非常に大きいという問題点がある。この理由として、LiF材料と CaSO_4 材料は粒径や結晶形が異なるため、通常の振動方式による付着方法では均一な蛍光体を作成しえないことがあげられる。

CaSO₄(Tm)+⁶LiF蛍光体をTLD バッジ用のTLD 素子として利用するには、TLD 素子の製造方法（蛍光体塗付の方法）の根本的な見直しを必要とするため、実用にはやや時間がかかると思われる。

4-4 第4章のまとめ

第4章の結果をまとめる。

1) ⁶Li₂¹⁰B₄O₇原材料中に含まれる不純物の除去、蛍光体の結晶生成過程の厳密な温度コントロールなどによって、従来の蛍光体に比べて約2倍の発光効率を持つ蛍光体が得られた。

2) リーダー光学系の検討により、ホウ酸リチウム蛍光体に対しては従来の約3倍、硫酸カルシウム蛍光体に対しては従来の約1.5倍の検出効率が得られた。ホウ酸リチウム蛍光体の発光効率の増加と合わせると、ホウ酸リチウム蛍光体の感度は従来のものの約5倍となる。
また、熱輻射によるノイズ成分は従来と同等である。

3) ホウ酸リチウム蛍光体に替わる中性子線検出用TLD として、⁶LiFとCaSO₄(Tm) の混合材料の利用を検討したが、製造工程の見直しが必要になるため、現時点での実用化は困難であることがわかった。

表4-10 試作CaSO₄(Tm)⁶LiF蛍光体の測定結果(照射線量 172mR)

| 素子 No. | # 1 | # 2 | # 3 | # 4 |
|--------|------|------|------|------|
| 1 | 1142 | 1144 | 1173 | 1176 |
| 2 | 1239 | 1159 | 1191 | 1148 |
| 3 | 1150 | 1160 | 1137 | 1173 |
| 4 | 1156 | 1158 | 1143 | 1131 |
| 5 | 1132 | 1171 | 1156 | 1120 |
| 6 | 1117 | 1120 | 1123 | 1103 |
| 7 | 770 | 817 | 815 | 756 |
| 8 | 1106 | 1125 | 1105 | 935 |
| 9 | 868 | 877 | 498 | 408 |
| 10 | 828 | 798 | 970 | 801 |
| 11 | 1118 | 1114 | 1113 | 1101 |
| 12 | 1137 | 1139 | 1124 | 1116 |
| 13 | 1147 | 1128 | 1113 | 1146 |
| 14 | 1100 | 952 | 936 | 995 |
| 15 | 1113 | 1120 | 1101 | 887 |
| 16 | 830 | 783 | 831 | 774 |
| 17 | 1101 | 1110 | 967 | 886 |
| 18 | 758 | 813 | 779 | 729 |
| 19 | 1116 | 1101 | 959 | 967 |
| 20 | 1140 | 1139 | 1156 | 1129 |
| 21 | 1133 | 1166 | 1157 | 1123 |
| 22 | 1137 | 1158 | 1130 | 1124 |
| 23 | 1143 | 1138 | 1148 | 1109 |
| 24 | 1132 | 1144 | 1149 | 1112 |
| 25 | 1124 | 1159 | 1115 | 1123 |
| 26 | 1136 | 1108 | 1123 | 1132 |
| 27 | 1124 | 1143 | 1118 | 1103 |
| 28 | 1144 | 1117 | 1101 | 1106 |
| 29 | 1163 | 1110 | 1131 | 1145 |
| 30 | 1109 | 1145 | 1136 | 1116 |
| 31 | 1122 | 1125 | 1128 | 1127 |
| 32 | 1124 | 1109 | 1142 | 1119 |
| 33 | 1158 | 1102 | 1111 | 1129 |
| 34 | 904 | 857 | 970 | 895 |
| 35 | 1115 | 945 | 959 | 904 |
| 36 | 1128 | 1107 | 1116 | 937 |
| 37 | 1107 | 1111 | 1109 | 1125 |
| 38 | 1103 | 1104 | 1120 | 970 |

(単位は mR eq.)

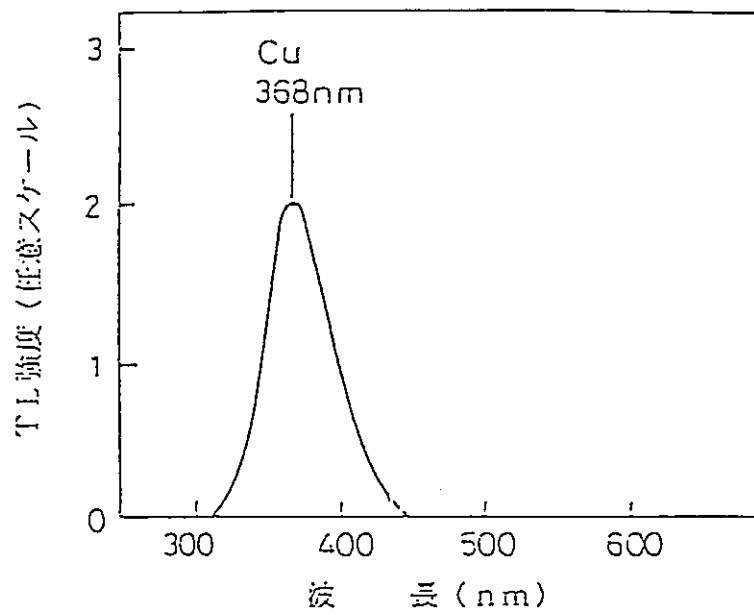


図4-7 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ の発光スペクトル

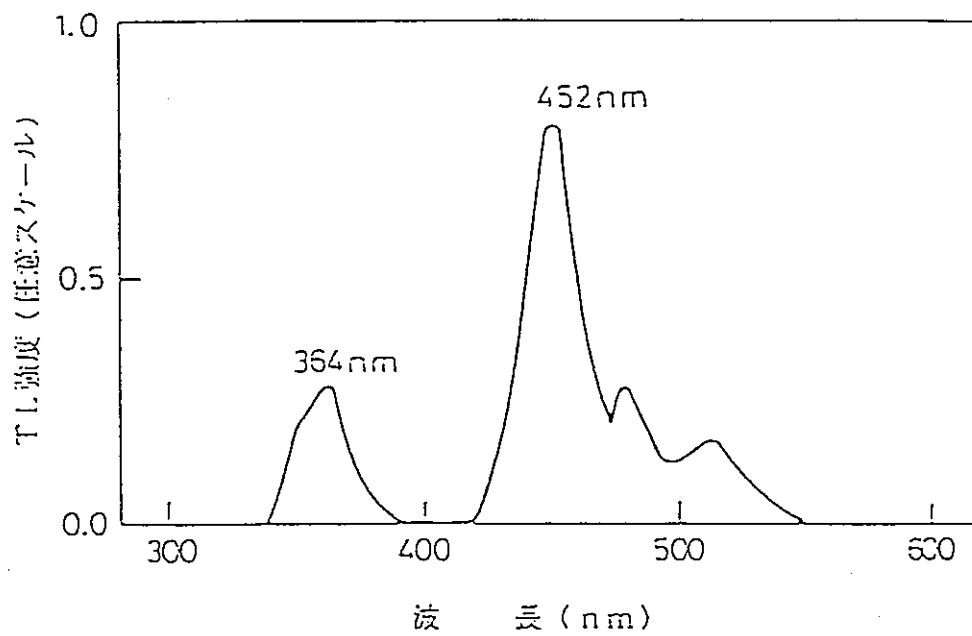


図4-8 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ の発光スペクトル

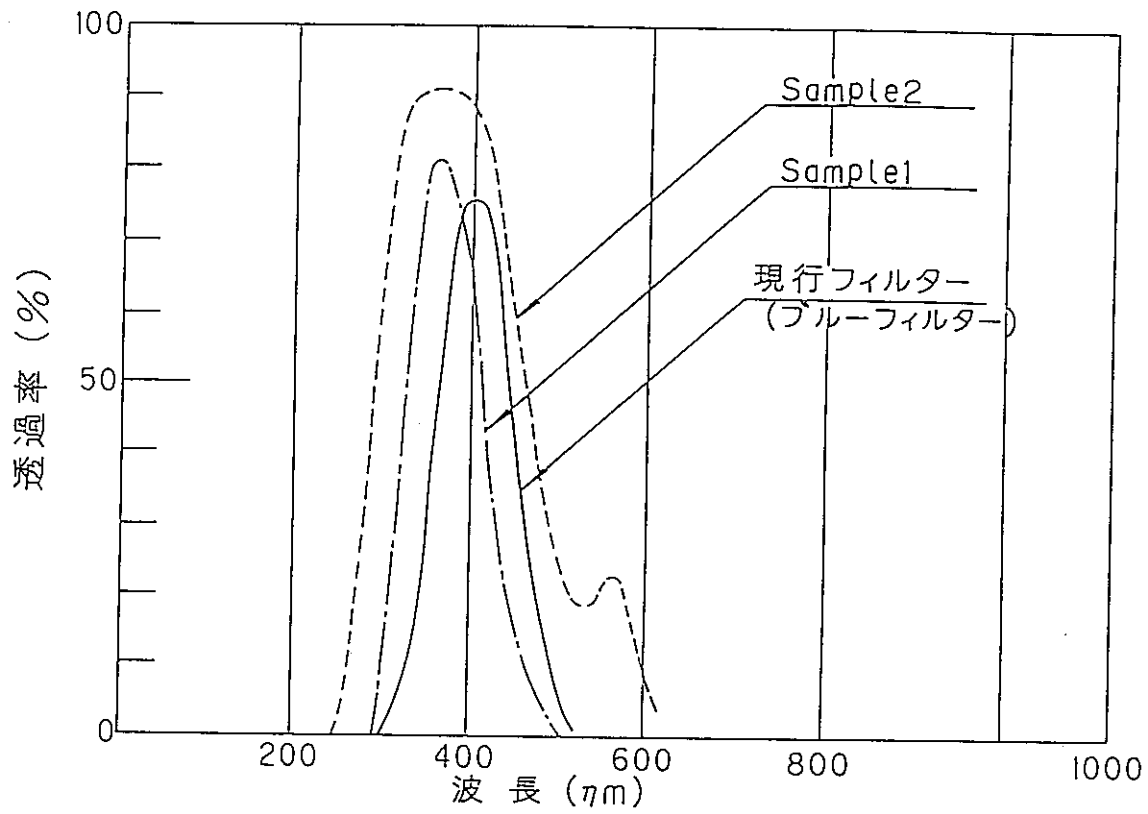


図4-9 ブルーフィルター及びサンプルフィルター1、2の分光特性

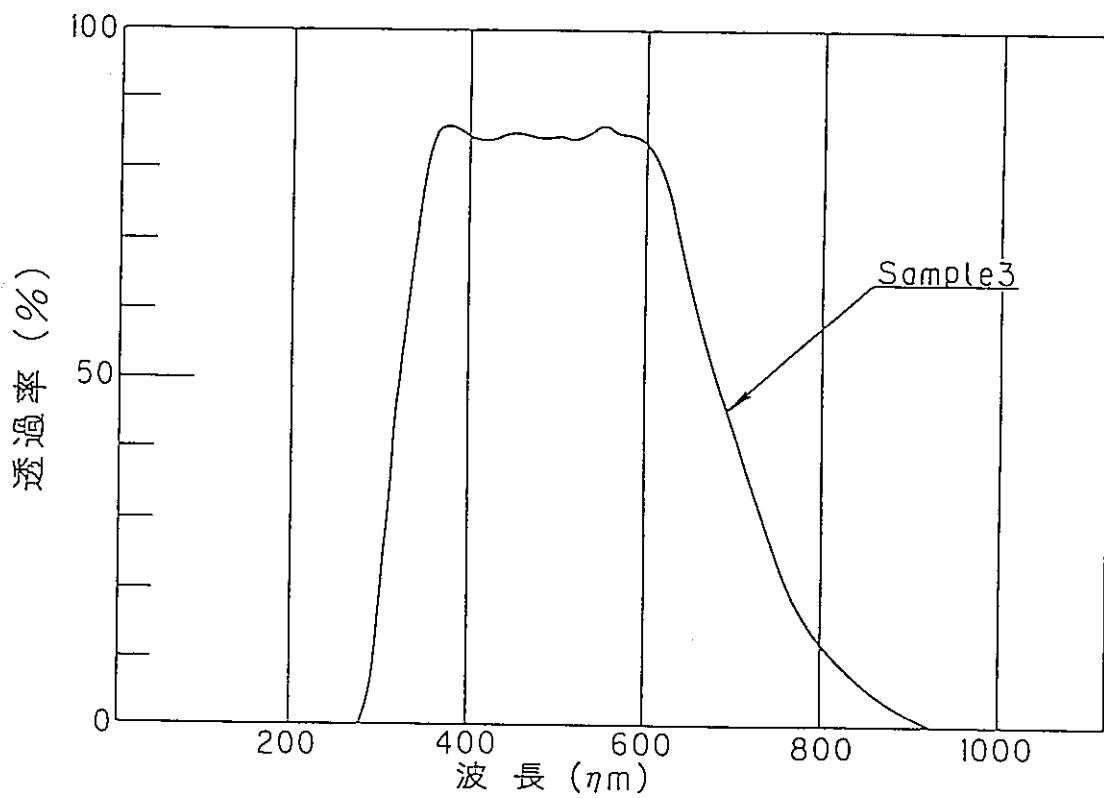


図4-10 サンプルフィルター3の分光特性

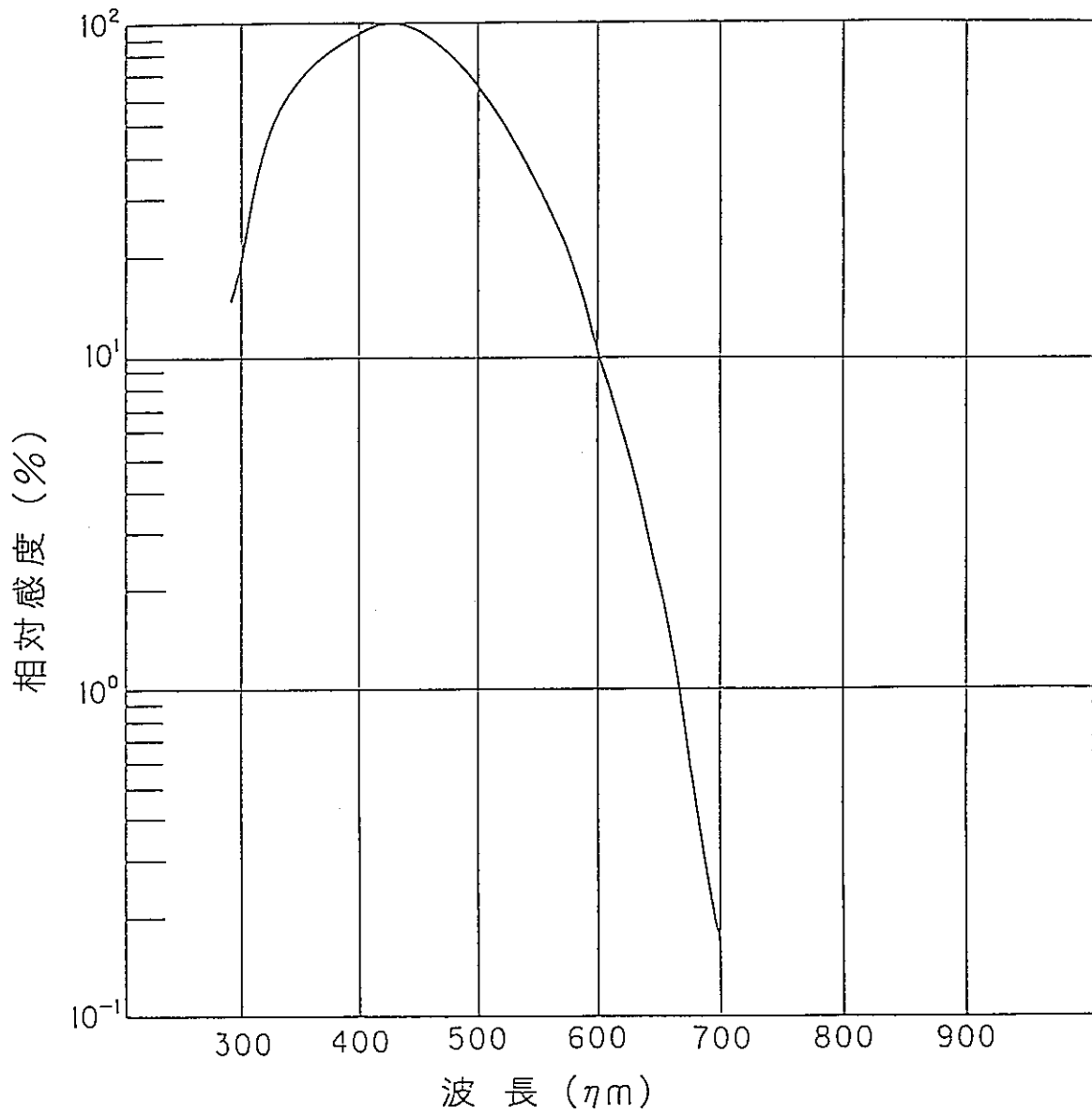


図4-11 光電子増倍管の分光感度特性

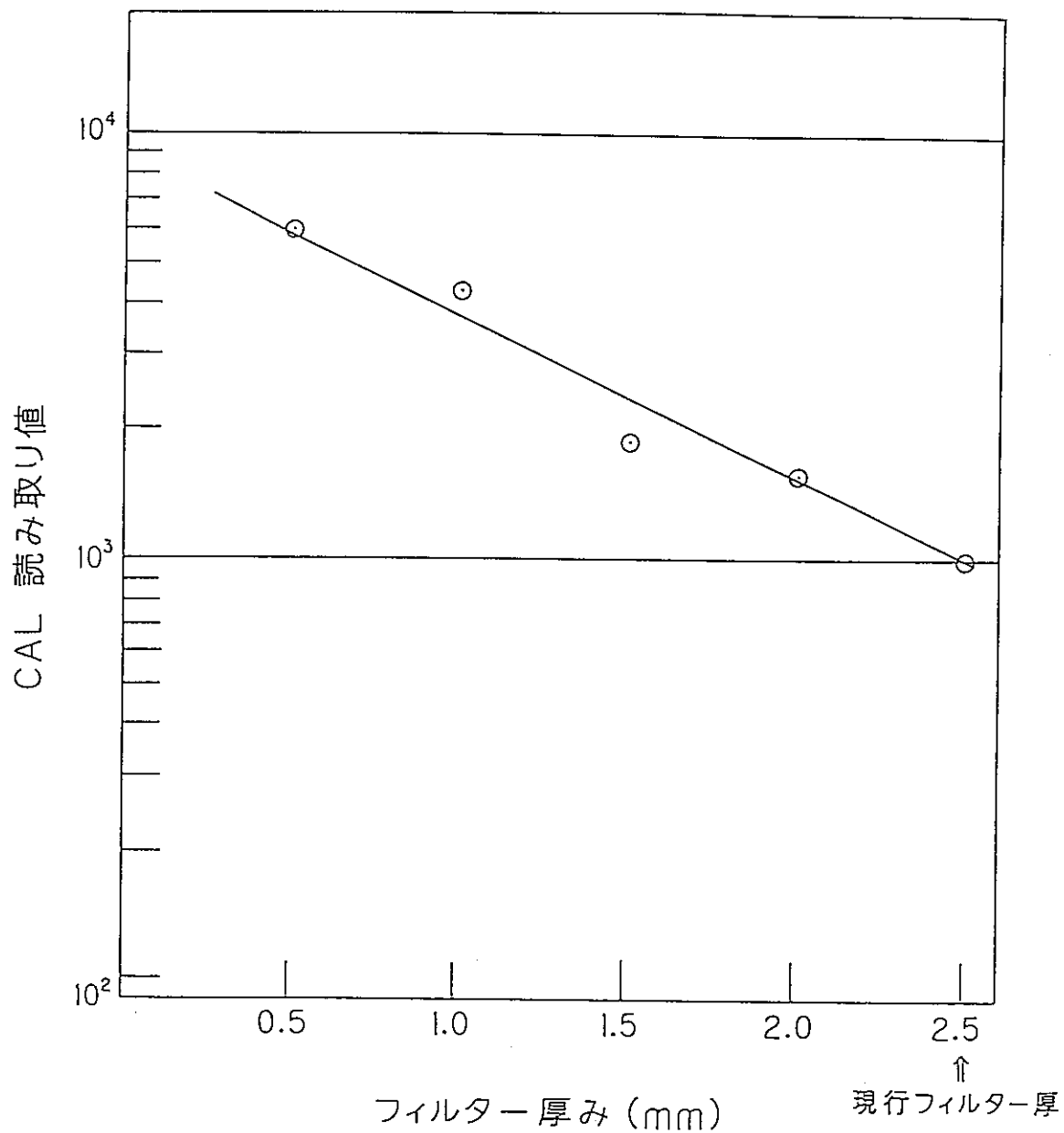


図4-12 フィルター厚さと CAL読み取り値の関係

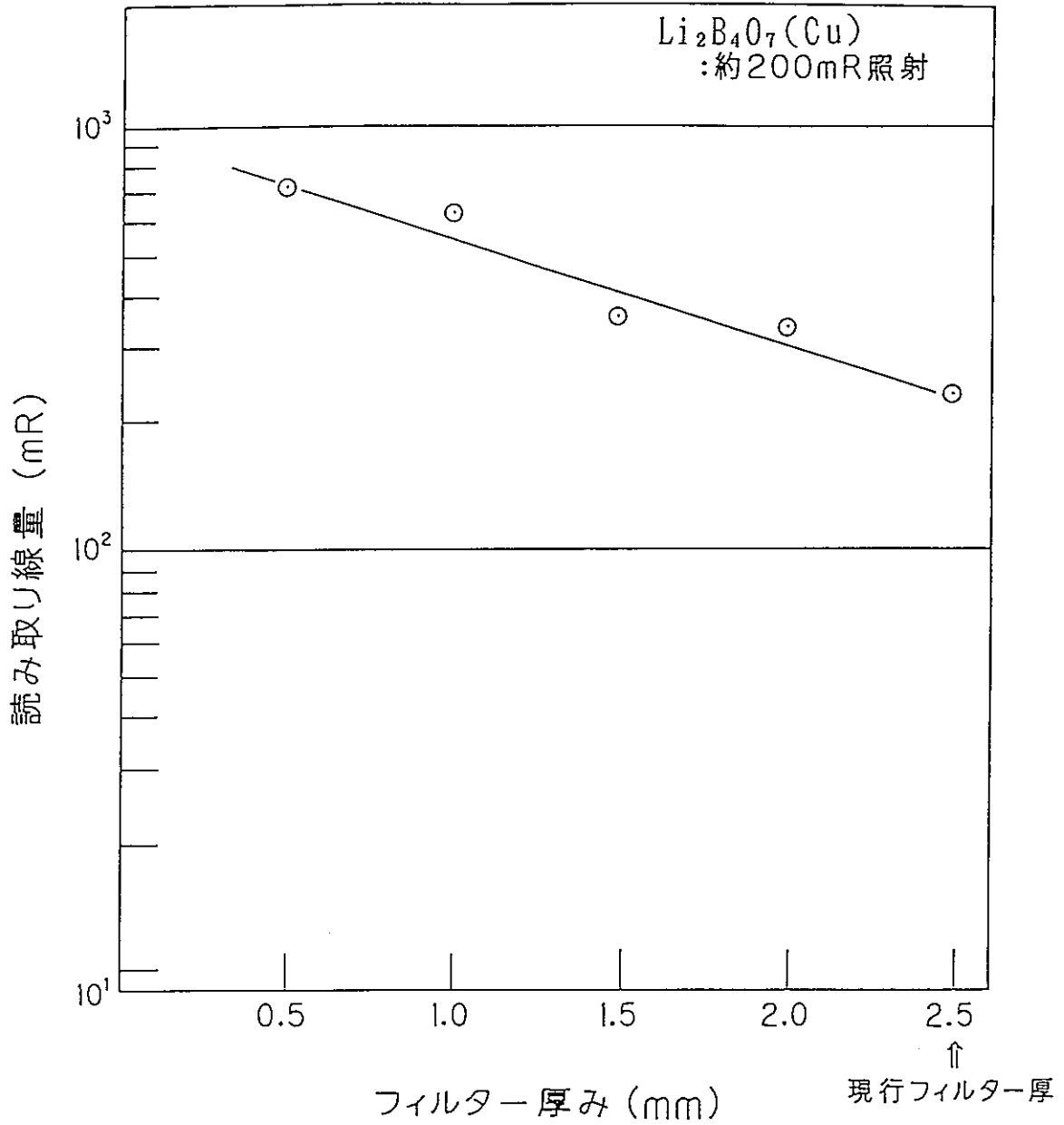


図4-13(a) フィルター厚さとホウ酸リチウム素子の読み取り線量値の関係

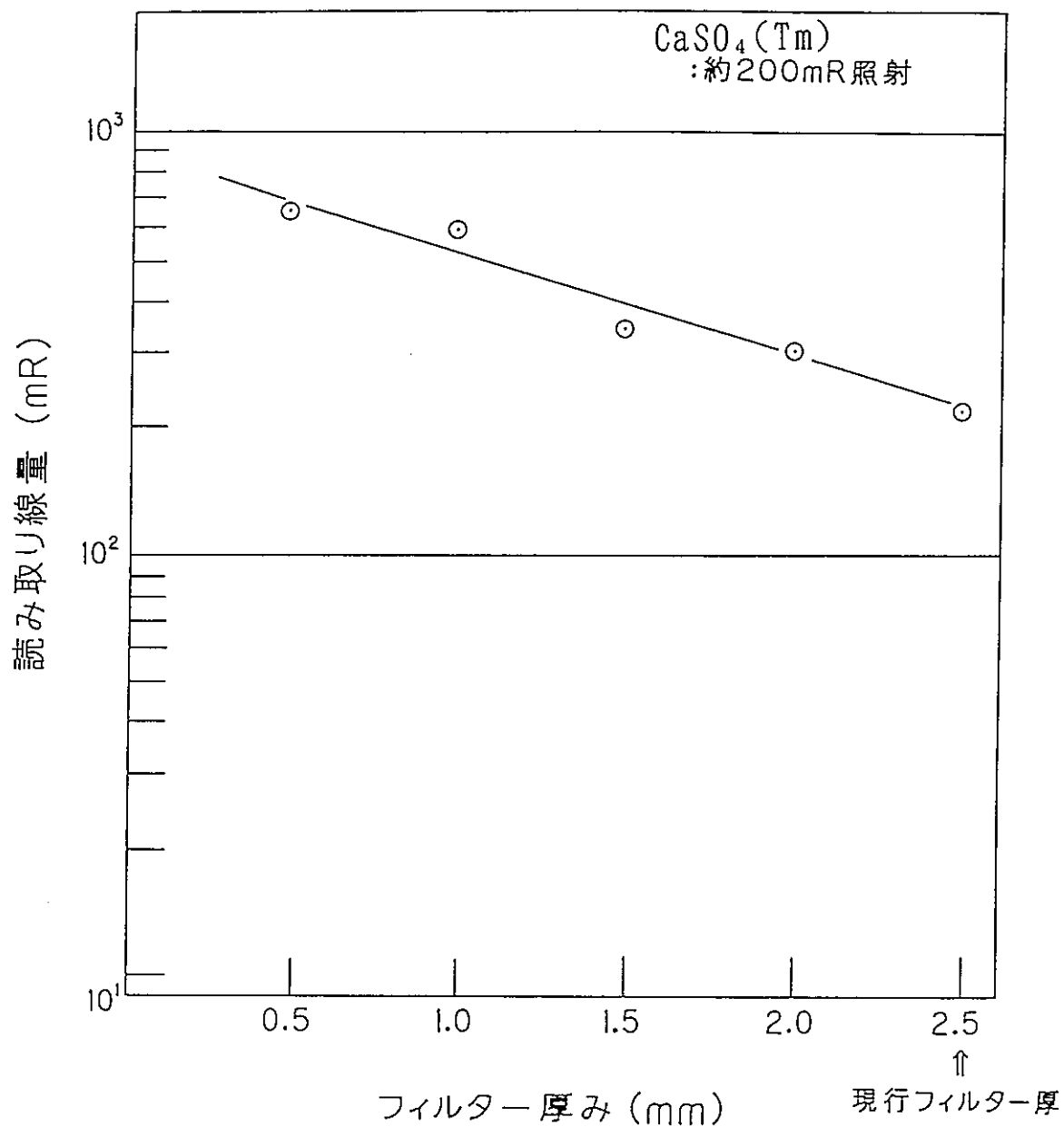


図4-13(b) フィルター厚さと硫酸カルシウム素子の読取り線量値の関係

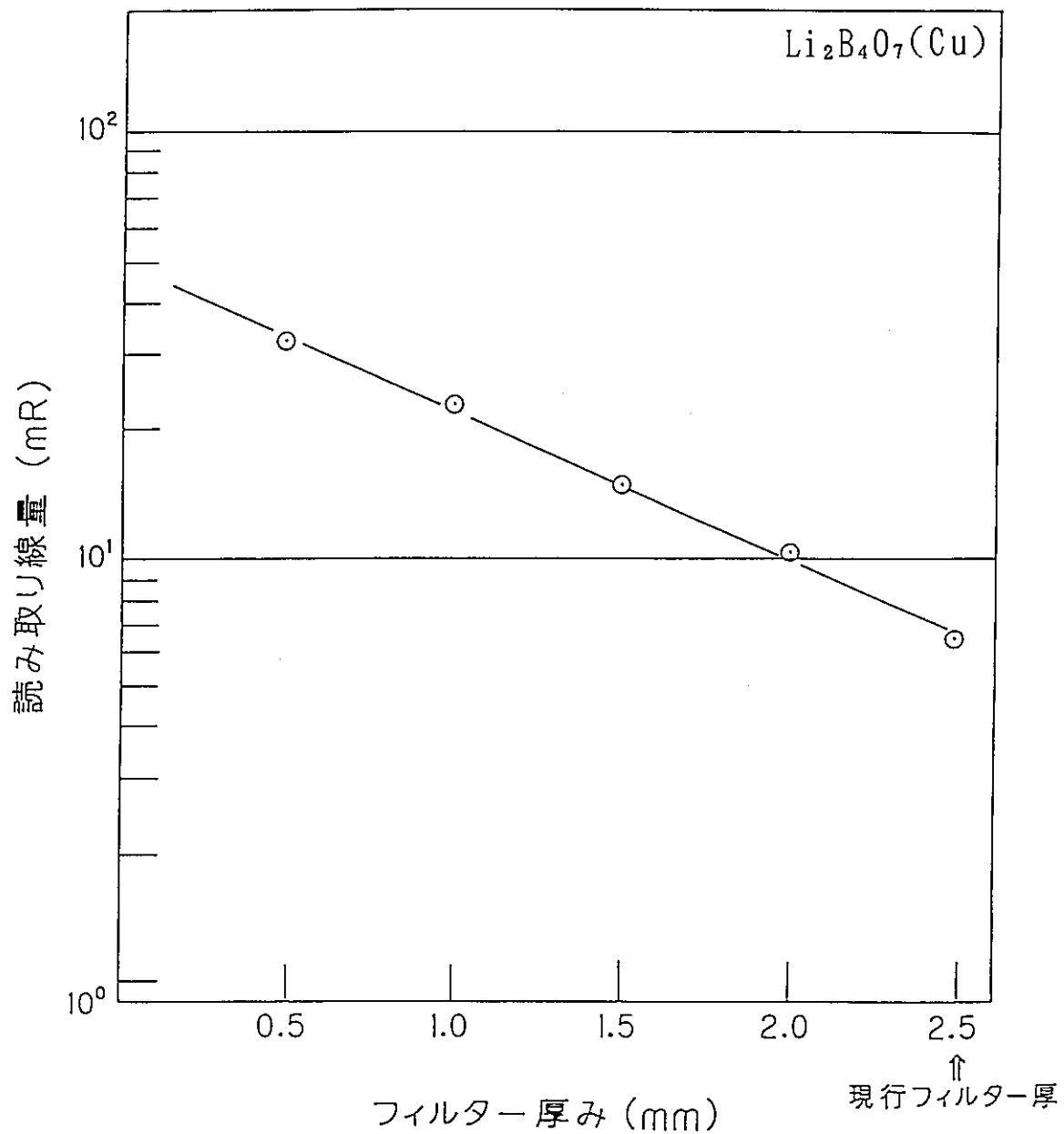


図4-14 フィルター厚さと熱放射線量(ゼロ線量)の関係

第5章 70 μ m及び3mm線量当量の直接測定の検討

TLD 素子蛍光体のフィルター厚さや幾何学的配置を検討することによって、70 μ m 及び3mm線量当量の直接測定の可能性について検討する。

(1) 現行素子の構造

現行のTLD バッジの β 線線量当量評価用素子 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$) のフィルター厚さを表5-1に示す。TLD バッジはプレート部、ホルダー部、バッジケースの3つから構成されており、それぞれに表に示すような厚さのフィルターが取り付けられている。70 μ m 及び3mm線量当量を直接測定するために必要と考えられるフィルター厚さ (それぞれ5、300 mg/cm^2 程度) と現行TLD バッジのフィルター厚さとが大きく異なっているため、現行のTLD バッジにおいては β 線線量当量評価用素子と β 線エネルギー評価用素子の発光量比の関数である補正係数を用いることで β 線の70 μ m 及び3mm線量当量を評価するという手法を採用している。

表5-1 原稿TLD バッジの β 線線量当量評価用素子のフィルター厚さ

| TLD素子 | プレート部 [mg/cm^2] | ホルダー部 [mg/cm^2] | バッジケース [mg/cm^2] | 合計 [mg/cm^2] |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| β 線線量当量評価用素子 | 11 | 3 | 3 | 17 |
| β 線エネルギー評価用素子 | 11 | 50 | 3 | 64 |

現行TLD バッジの β 線70 μ m 線量当量評価用TLD 素子の詳細構造を図5-1に示す。現行素子の場合、 β 線は蛍光体面の裏側から入射する。すなわちバッジケース部の β 線入射窓 (3 mg/cm^2)、ホルダー部の30 μ m (約3 mg/cm^2) のマイラー膜、そしてプレート部の約80 μ m のペーステープ (約11 mg/cm^2) を通過して蛍光体に到達する。これら3つのフィルターの合計厚さは17 mg/cm^2 になるため、500keV以下の低エネルギー β 線に対する感度は著しく減少する。

また素子が β 線を検出する際に立体角をできるだけ大きく取ることが望ましいが、図に示すように現行のTLD 素子の構造のままでは、入射角65° 以上では β 線を検出できないという問題がある。

(2) 70 μm 線量当量評価用素子の構造案

現行のTLD リーダーは継続使用するので、プレート部の基本構造は変更しないものとする。すなわちプレートの外形、サイズは現状のままとする。また、3mm線量当量評価用の素子については、現行の β 線エネルギー評価用素子のフィルター厚さを $300\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度とすることで比較的容易に実現できると考えられるため、ここでは70 μm 線量当量評価用素子の構造についてのみ検討する。

β 線の測定に用いるホウ酸リチウム蛍光体そのものの厚さが約 $15\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度あるため、70 μm 線量当量を直接測定するには、その前面フィルターの厚さを約 $5\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度にする必要がある。上述したようにフィルターは3つの部分からなるが、このうちバッジケース部の厚さ $3\text{mg}/\text{cm}^2$ の入射窓については、強度的な問題からこれ以上に薄くすることができない。従って、プレート部及びホルダー部のフィルター厚さを可能な限り薄くする必要がある。

そこでTLD 素子部分の構造を次のように変更する。

- 1) 現行のTLD バッジでは蛍光体面の後方から β 線が入射するが、この部分の構造を反転させ、蛍光体面側から β 線を入射させる。この構造を選択することによりベーステープ部分(厚さ $11\text{mg}/\text{cm}^2$)はフィルターとして機能しない。
- 2) 現行の蛍光体面側には厚さ100 μm のカバーテープ(図5-1には示していない)が取り付けられているが、このカバーテープを取り除くことによって β 線を直接蛍光体に入射させる。

TLD 素子部分の構造を以上のように変更することによって、蛍光体前面のフィルターを限りなく薄くすることができ、70 μm 線量当量の直接測定が可能になる。また、蛍光体が β 線を検出する幾何学的効率も多少改善される。

(3) 70 μm 線量当量評価用素子の製造方法

上述した反転構造を取った場合、蛍光体面が剥き出しとなるため、その防護対策が必要となる。ここでは蛍光体面の防護のための製造方法を検討した。

蛍光体面側のカバーテープ(100 μm)を取り除く代わりに、直接蛍光体面に吸湿防止のための樹脂をコーティングする。このときの樹脂は吸湿性が最も小さく、また透明で耐熱温度の高いものが必要となるが、現在のところフッ素系樹脂が最適と考えられる。このフッ素系樹脂のコーティング方法は液状、粉末状、膜状の3種類の方法があり、現在考えている製造案を図5-2に示す。ただし、ここでは蛍光体をプレートに固定する方法は現行の方式をその

まま踏襲することを前提にする。

第1案は、ベースフィルムにフッ素フィルム（約 $12.5\mu\text{m}$ ）を熱溶着した後にフィルムを加熱しスポットで蛍光体を落下し接着する方法である。その後、蛍光体表面に同じ厚さのフッ素フィルムを熱溶着する。第2案は、蛍光体接着までの工程は第1案と同様だが、コーティングの方法が変わる。フィルムの代わりに、フッ素樹脂粉末を含んだ溶液を接着した蛍光体の上に落とし熱によって固める。この方法は、手指用のTLD素子に現在用いている製法である。第3案は、蛍光体とフッ素樹脂を混合した後、粉末状のフッ素樹脂を蛍光体表面にふりかけ、熱によって固める方法である。

今後、これらの製法のうちの方法が最適かどうかは実験的に確認して行く予定である。

（4）改良ホルダーの構造案

ホルダー部の構造はバッジケースの構造との関係もあり、次年度以降本格的な検討に着手する予定であるが、ここでは一つの検討案について述べる。

TLD素子は現行の β/γ 線用と同じく4個用いるが、素子#1を $70\mu\text{m}$ 線量当量、素子#2を 3mm 線量当量、素子#3、#4を 1cm 線量当量評価用とし、全てホウ酸リチウム蛍光体を利用する。

素子#1、#2については、これまでと同様にマイラー膜やABS樹脂を使用してホルダー、バッジケースを製作する。一方、素子#3、#4の場合、バッジケース表面にある厚さ $1000\text{mg}/\text{cm}^2$ のドーム状凸構造部分は β 線検出用素子の方向依存性に影響を与えるなど問題がある。そこで、改良型ではこの凸構造部分にABS樹脂以外の密度の大きな材料を選択し、凸構造をできる限り小さく、あるいは削除する方向でバッジケースのデザインの検討を行う。

ABS樹脂に代わる代替物質の案としては、フッ素系樹脂があげられ、これは密度が $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ であり $1000\text{mg}/\text{cm}^2$ の厚さにするには 4.5mm 程度の厚さで済む。これは現行のバッジケースの凸構造部分の半分の厚さに相当する。

図5-3にホルダー部分の改造案を示す。ホルダーはおよそ縦 15mm 、横 48mm 、高さ 5mm の大きさである。従来の個人識別用のナンバーコードホールを排して、片面（裏側）にバーコードラベルを張り付けすることによって小型化を図る。表側については、素子#1はこれまでと同様にマイラー膜、素子#2はABS樹脂とし、素子#3、#4のみ密度の大きいフッ素系樹脂とする。このときフッ素系樹脂の厚さは $600\text{mg}/\text{cm}^2$ までならばホルダー部分のみで賄えるので、バッジケース部分の厚さはかなり薄くすることができる。

これらの改良により、よりコンパクトな線量計、バッジケースの設計が可能になると思われる。

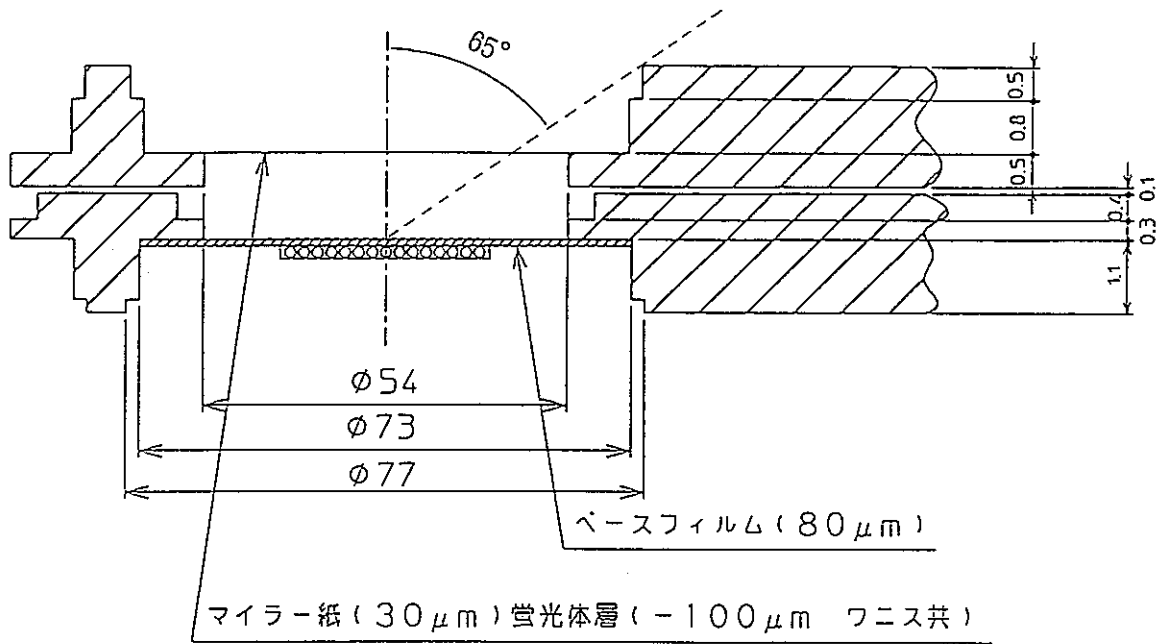


図5-1 現行TLDバッジの β 線検出用素子の詳細構造
(プレート部とホルダー部)

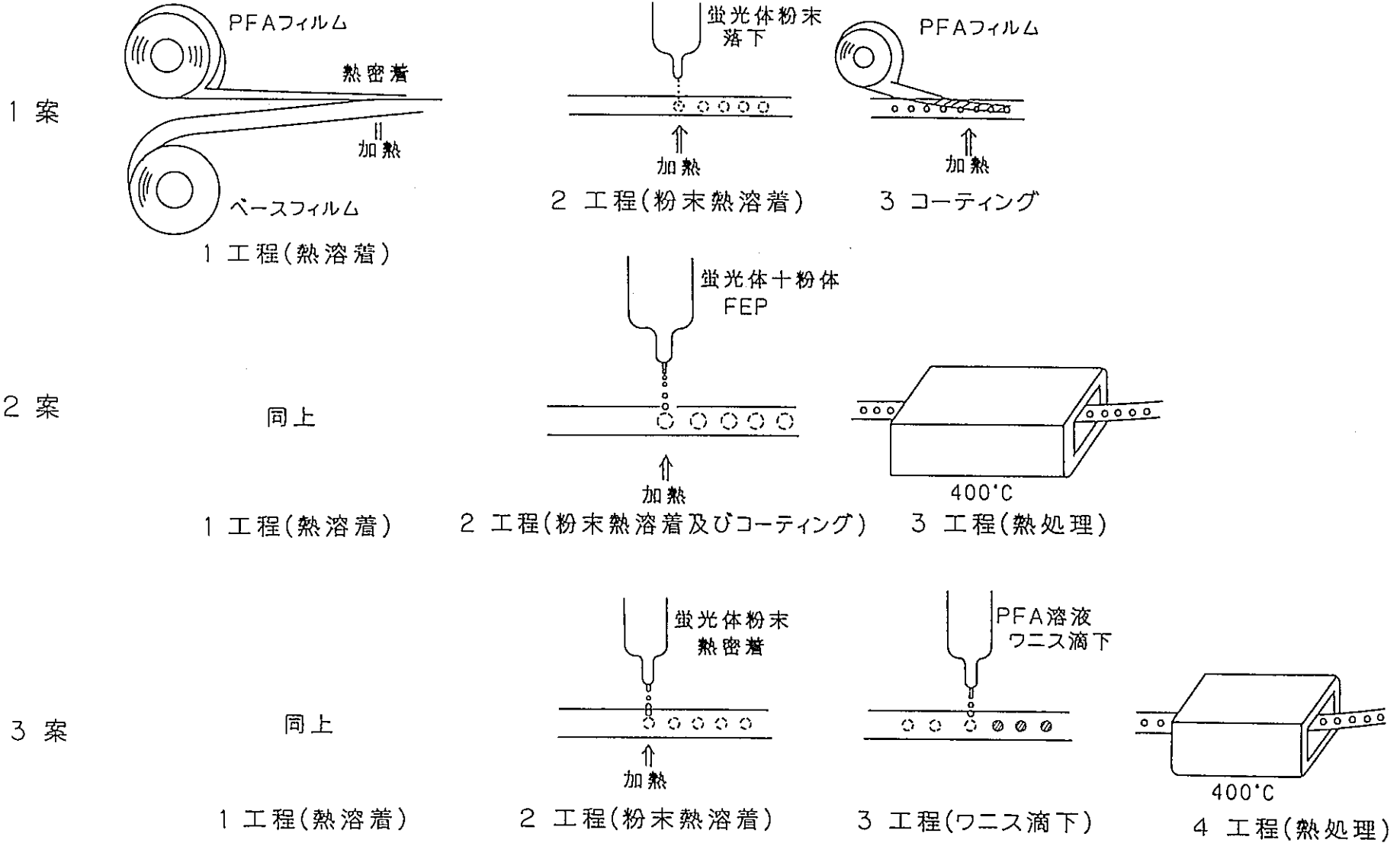
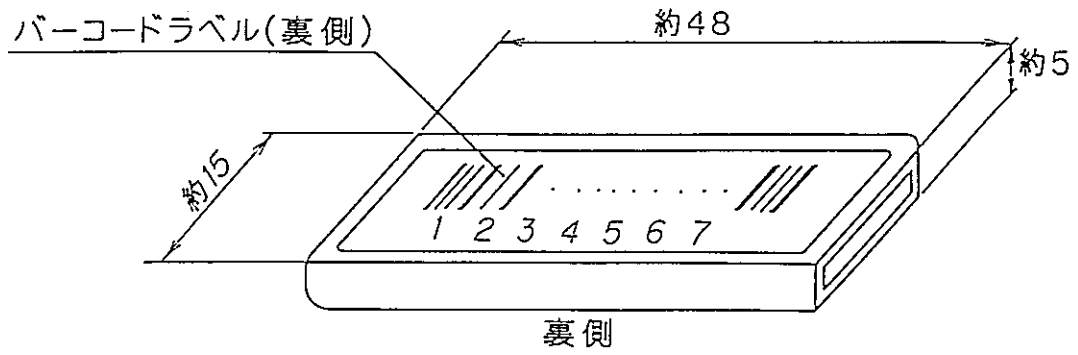
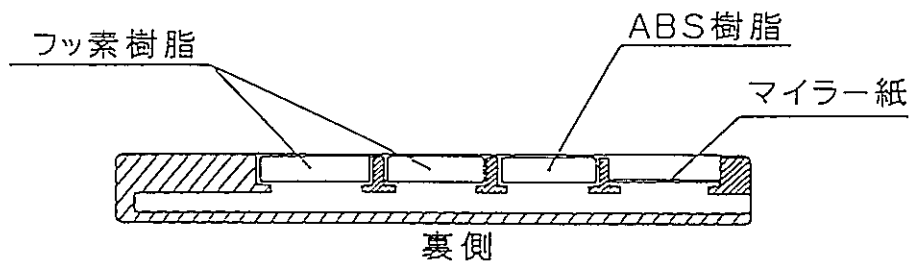
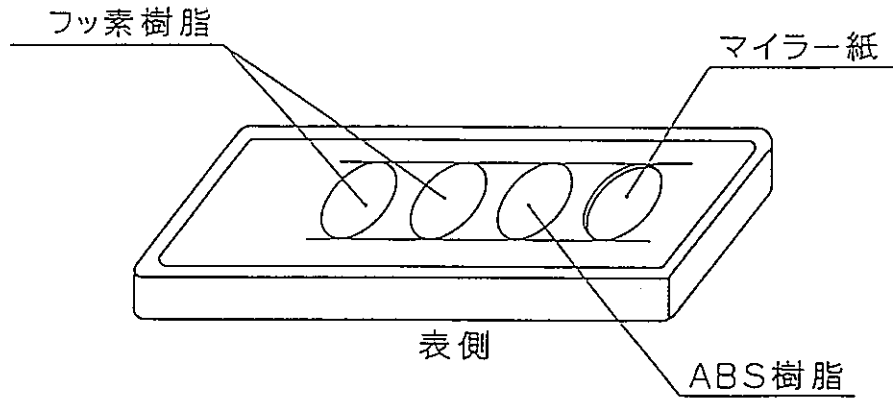


図5-2 蛍光体面へのフッ素系樹脂のコーティング方法案



改良ホルダーの外観図



改良ホルダー断面図

図5-3 改良型ホルダー案

第 6 章 結 論

TLD バッジに用いるTLD 素子の改良という目的で一年間にわたって研究を行ってきた。その結果、以下のような成果が得られた。

(1) γ 線測定用TLD 素子については、ホウ酸リチウム蛍光体に鉛等の原子番号の大きい金属元素を微量添加する方法を開発し、蛍光体の基本特性を変化させることなく、そのエネルギー応答特性を告示別表第4に記載される1 cm線量当量のエネルギー依存性に合致させることが可能であることがわかった。

(2) 中性子線測定用TLD 素子については、ホウ酸リチウム蛍光体の製法を改良することにより現行のものよりも発光効率にして約2~3倍高いものを製造できる目安がたった。また、リーダー光学系の検討により、ホウ酸リチウムの発光波長に分光特性がより合致したフィルターの調査、研究をおこない、ノイズレベルが現行と同等で検出効率を約3倍にすることができた。

以上の結果から、中性子線検出用TLD素子の感度を現行の約5倍にすることが、技術的に可能になった。

(3) 70 μ m、3 mm線量当量評価用TLD素子については、素子の製法、ホルダー部の構造等を検討した結果、70 μ m、3 mm線量当量の直接測定が可能なTLD バッジの実用化の目安が得られた。