

PNC IJ1600 98-004

社内資料

本資料は 年 月 日付けで登録区分、

変更する。 0 1. 10. -4

[技術情報室]

過熱液滴型中性子検出器の開発研究(Ⅲ)

(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究中間報告書)

1998年3月

北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻

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)

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないように管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないように注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒311-13

茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
技術開発・技術管理室



社内資料
PNC 2J1600 98-004
1998年3月

過熱液滴型中性子検出器の開発研究 (Ⅲ)

成田 正邦、澤村 晃子*

要旨

原子炉施設、核燃料取扱施設においては、作業環境中の空間線量率や放射線業務従事者の被曝管理のために、中性子、 γ 線の線量測定が不可欠である。中性子検出器の一つである過熱液滴型検出器は高感度な中性子線量計としてこの分野の要求に応える有望な検出器である。作業環境はしばしば 中性子・ γ 線（或いは陽子や電子など）混在場であることが多く、また厳しい温度条件下におかれる場合も少なくない。種々の環境で線量測定を行なうためには、広範な放射線に対する過熱液滴型検出器の放射線検出動作の一般的理解が重要である。

本研究はこれまで実施してきた過熱液滴型検出器の放射線検出動作の解析や基本特性の取得をすすめると共に、その結果に基づき、この型の検出器の現場の放射線管理への適用性を明らかにすることを目的としている。このために今年度は以下の検討を行った。

- (1) 過熱液滴型検出器の試作とその検討
- (2) 過熱液滴型検出器の基本特性の把握
 1. 中性子検出感度の温度・圧力および中性子エネルギー依存性
 2. γ 線検出感度の計算
- (3) 放射線管理への適用性の調査検討
 1. エネルギー弁別検出器の可能性
 2. 線量評価法
 3. 検出感度の温度依存性の補償

※本報告書は成田正邦、沢村晃子が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：090D0160

事業団担当部課室及び担当者：大洗工学センター安全管理部安全対策課 高野良正

*北海道大学 工学部 量子エネルギー工学専攻



OFFICIAL USE ONLY
PNC EJ1600 98-004
March 1998

Development of Superheated Drop Neutron Detector (III)

Masakuni Narita*
Teruko Sawamura*

Abstract

Measurements of neutrons as well as γ rays are necessarily required in the management of area monitoring and occupational exposure in facilities related to nuclear reactors, nuclear fuel, and so on. A superheated drop detector (a neutron detector) has a dose limit of detection lower than any other practical ones at present, and therefore is advantageous in this requirement. The work areas in the nuclear facilities often have the mixed radiation fields with neutrons and γ rays (and/or protons and electrons) and may be under severe temperature conditions. For performing the dose measurement in such varied environments, we must study the general response of the detector for a wide range of radiation.

The purpose of this study is to extend the theoretical analysis and experimental investigation of the detection process and to recognize the applicability of this detector for the practical use in nuclear facilities. In this fiscal year, the following are discussed ;

- (1) Composition and making procedure of the detectors,
- (2) Theoretical and experimental study of the basic process of the detector,
 1. Neutron detection sensitivity dependence on temperature, pressure and neutron energy,
 2. Calculation of gamma ray detection sensitivity,
- (3) Applicability of the detector for practical use,
 1. Availability of the detector for spectrum unfolding,
 2. Method of dose estimation,
 3. Compensation of temperature dependence of detection sensitivity

Work performed by Masakuni Narita and Teruko Sawamura under contact with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
PNC Liaison : Safety Administration Section, Health & Safety Division.
O-arai Engineering Center

*Division of Quantum Energy Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

第1章 緒言	1
第2章 過熱液滴型検出器の試作	3
2.1 検出器の試作	3
2.1.1 成分	3
2.1.2 作成方法	3
2.1.3 作成方法に対する考察	6
2.1.4 中性子照射試験	7
第3章 過熱液滴型検出器による線量評価法	13
3.1 受動型計数法	13
3.1.1 気泡目視計数	13
3.1.2 気泡化による体積変化に基づく方法	13
3.2 能動型計数法	13
3.3 本研究で用いた計数法	14
第4章 過熱液滴型検出器の中性子検出感度とその応用	17
4.1 圧力依存性実験	17
4.2 エネルギー依存性と温度依存性	21
4.3 過熱液滴型検出器の応用と問題点	30
4.3.1 圧力変化によるエネルギー Spektrum 評価	30
4.3.2 検出感度の温度依存性について	35
第5章 γ 線検出感度計算	36
5.1 γ 線に対する応答機構	36
5.2 検出感度計算	40
5.2.1 感度の定義、幾何形状	40
5.2.2 計算結果	41
5.3 まとめ	47
第6章 結論	49

第1章 緒言

原子炉施設、核燃料取扱施設においては、作業環境中の空間線量率や放射線業務従事者の被曝管理のために、中性子、 γ 線の線量測定が不可欠である。またしばしば、中性子と γ 線の混在場における測定が要求されることが多い。中性子検出器の一つである過熱液滴型検出器は γ 線に感度がないこと、検出限界が現在実用に供されている中性子検出器に比べて低いことから、この要求に応える有望な検出器である。

一方、過熱液滴型検出器は、近年は γ 線用検出器としても使用されているが、その検出特性の解析は行われていない。中性子・ γ 線(或いは陽子や電子など)混在場における中性子測定の立場からも、この型の検出器の適用範囲の拡大の観点からも、中性子から、 γ 線を含む低LET放射線にわたる広範な放射線に対する過熱液滴型検出器の放射線検出動作の一般的理解は重要である。

本研究はこれまで実施してきた過熱液滴型検出器の放射線検出動作の解析や基本特性の取得をすすめると共に、その結果に基づき、この型の検出器の現場の放射線管理への適用性を明らかにすることを目的とする。このために今年度は以下の検討を行った。

- (1) 過熱液滴型検出器の試作とその検討
- (2) 過熱液滴型検出器の基本特性の把握
 1. 中性子検出感度の温度・圧力および中性子エネルギー依存性
 2. γ 線検出感度の計算
- (3) 放射線管理への適用性の検討
 1. エネルギー弁別検出器の可能性について
 2. 線量評価法
 3. 検出感度の温度依存性の補償

本文の第2章では過熱液滴型検出器の試作について述べている。今年度はこれまでの方法と少し違った方法を採用している。

第3章は過熱液滴型検出器における線量評価法(気化による体積変化検出・気泡計数)について簡単に概観し、今年度本研究で開発した気泡計数法について説明した。

第4章は中性子検出器としての特性について述べた。まず中性子検出感度の温度・圧力および中性子エネルギー依存性の実験結果と計算との比較が述べられている。実験では北大におけるAm-Be中性子源による照射実験と東北大学における加速器中性子源による単色中性子照射実験が示されている。この結果から過熱液滴型検出器をエネルギー弁別検出器として用い、簡単なスペクトル推定を行う可能性について議論した。最後に、通常の使用では問題となる検出感度の温度依存性をどのように補償するかその手法の例を示した。

第5章は γ 線検出器としての特性について述べた。 γ 線に適用可能と思われる検出液体の検討、昨年に引き続いてのオクタフルオロプロパンを検出液体とするときの γ 線検出感度の計算のその解析、他研究者による実験結果との比較等について述べた。

第6章では全体のまとめと今後の方針を述べた。

昨年度の報告書¹⁾に詳細を記した事項については今年度は記述を割愛している。また本文中では過熱液滴型(バブル)検出器(Superheated Drop(Bubble) Detector)をSDDと略記した。

【参考文献】

- 1)成田、澤村:過熱液滴型中性子検出器の開発研究(Ⅲ)(動力炉・核燃料開発事業団 受託研究中間報告書,PNJ PJ 1600 97-002,1997)

第2章 過熱液滴型検出器の試作

この章では、1-buteneを検出液体に用いたSDDの試作とその照射試験について述べる。2.1ではSDDの試作法について述べた。現在、過熱液滴型検出器はBTI社などにより市販されている。市販品は、高感度・くり返し使用性などの面ですぐれているが、SDD中の検出液体の成分が明らかにされていない^{2.1)}。本研究では高感度で安定性・再現性のよいSDDの開発は必要不可欠である。試作と照射を繰り返すことで中性子に対して感度の高いSDDの作成が可能になってきている。

2.1 検出器の試作

試作の際に用いる検出液体に必要な性質は、常温で過熱状態を維持できることその他に、

- ② 支持媒質であるグリセリン或いはグリセリン+高分子物質に不溶であること、
- ③ 沸点は、検出器作成操作が行える程度には十分高いこと、(沸点が低すぎると、試作中に過度に気化する)

などが求められる。

本研究で選択した液体はbutene(C_4H_8 ; 沸点 $+3.8\sim-7.0^\circ C$)である。buteneには4種類の異性体が存在し、異性体間の感度の違いを検討することができる。主として、1-butene(沸点 $-6.3^\circ C$ 、密度 $0.5951g/cm^3$)を用いて検出器を作成することとした。

2.1.1 成分

グリセリン(glycerol, $C_3H_8O_3$; 融点 $\sim 18^\circ C$ 、密度 $1.26g/cm^3$)より比重の小さいbuteneを検出液体に用いる。検出器はIng型とし、液滴支持媒質ポリマーに以下の重合剤を用いた。^{2.2)}

【重合に用いる試薬】

アクリアミド・メチレンビス30%溶液 (A液)……共重合橋かけポリマー
テトラメチルエチレンジアミン; TEMED (B液)……重合体の硬度に寄与
過硫酸アンモニウム10%溶液 (C液)……重合時間に寄与

2.1.2 作成方法

現在までに行ってきた作成方法を順に示した。現在の方法に到るまでに大きく分けて3回作成方法を改良している。

作成方法Ⅲから、検出液体を微小な液滴にするために、ホモジナイザーを導入した。その結果、これまで作成した検出器よりも感度の高い検出器を作成することが可能になった。

(1) 作成法 I (Dec.1995～)^{2,3)}

検出器一本あたりの量

A : 2.5cc, B: 40 μ l(60 μ l), C:40 μ l(60 μ l)、グリセリン:5cc

容積10mlの小バイアルに、グリセリン・A・Bを加えてから、buteneを入れて手振りする。20分程度冷蔵庫で放置した後、Cを加えて高分子を重合させる。5時間程度経過した後、Freon-12を加えて10時間以上冷蔵庫に放置する。

この作成方法では、少量のC液をバイアル全体に一様に混合させることが困難で、局所的な重合が起こりやすく、重合が短時間で完了してしまうことが多かった。そこで、C液がバイアル全体に混ざるように、次に示す方法に変えた。

(2) 作成法 II (Jan.1996～)^{2,3)}

検出器一本あたりの量

A : 2.5cc, B: 40 μ l(60 μ l), C:40 μ l(60 μ l)、グリセリン:5cc

容積10mlの小バイアルに、グリセリンとbuteneを入れて手振りする。しばらく放置した後、A、B、C液の順に加えて水道水でバイアル全体を冷やししながら、高分子を重合させる。5時間程度経過した後、Freon-12を加えて10時間以上冷蔵庫に放置する。

この方法により重合はゆっくり進むようになったが、壁面に空洞ができることが多かった。この原因は、重合による発熱により液滴の気化が起こるためであると考えられる。また、バイアル中に最終的に保持される液滴数のばらつきが大きく、液滴が大きいか、中性子照射して得られる気泡数が少ないことが多かった。これらの問題点を解決するために、小さな液滴を多く保持する検出器の作成方法の模索を開始し、現在は次に示す方法で作成している。

(3) 作成法 III (May.26.1997～)

検出器一本あたりの量

A : 2.5cc, B: 40 μ l, C:20 μ l、グリセリン:5cc

【改良の目的】

- ① 液滴を小さくする。
- ② 空洞の生成の防止
- ③ 液滴数のばらつきの小さい検出器の作成

【手順】

まず、それぞれの小バイアル(10ml)に入れたA、B液をドライアイスで冷凍する(A:2.5cc、B:40 μ l)。そして、耐圧ガラス容器内でグリセリンとC液を混合し、最後にbuteneを加えて、ホモジナイザーで攪拌する(Fig.2.1.1)。

ガラス容器に加えるbuteneの量は目視で、高さ3mm程度である。(作業中に消失するbuteneがあるために、最終的なbutene液滴の総量は定量できない。そのため、最初に加えるbuteneの量は定量していない。)ミキサーの回転数は、13500~20500回転/min.(負荷のないとき)に設定し一度の攪拌時間を3秒間以下とした。(長時間攪拌すると、攪拌による温度上昇が大きくなるので、3秒間程度が限界であると経験的に判断した。)攪拌回数はグリセリンとbuteneの混ざり具合により5~10回程度とした。

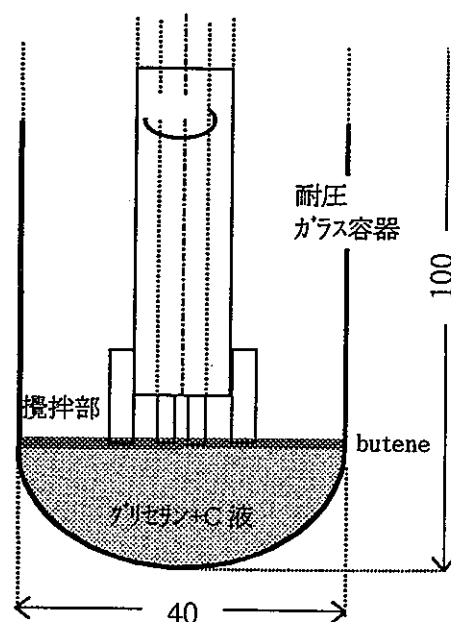


Fig.2.1.1 ホモジナイザー

しばらく冷却した状態で放置すると、ガラス容器内がbuteneの飽和蒸気で満たされ、混合物の液面に液体のbuteneが生じる。また、5分間程度の冷却でもグリセリンの粘性が高くなるため、圧力を少しずつ開放することにより、発泡する液滴数を減らすことができる。冷やしておいた大バイアル(30ml)に移し、冷蔵庫に入れて5分間程度放置する。そして、冷凍したA・B液の入っている3本のバイアルに等量ずつ移し替える。凍ったA・B液と接触する面でC液との反応により局所的な重合が生じないように、水道水で冷却しながら中身が均一になるように10~15分程度よく振り混ぜる。重合の進み具合は、加えるbutene及びC液の量により若干異なる。重合開始の兆候として、粘性が高くなったり、重合時の発熱による気泡が観測され始める。同時に作成しているうちの一本でもこれらの兆候が見られたら、振るのをやめて、氷水に入れて冷蔵庫内に放置する。

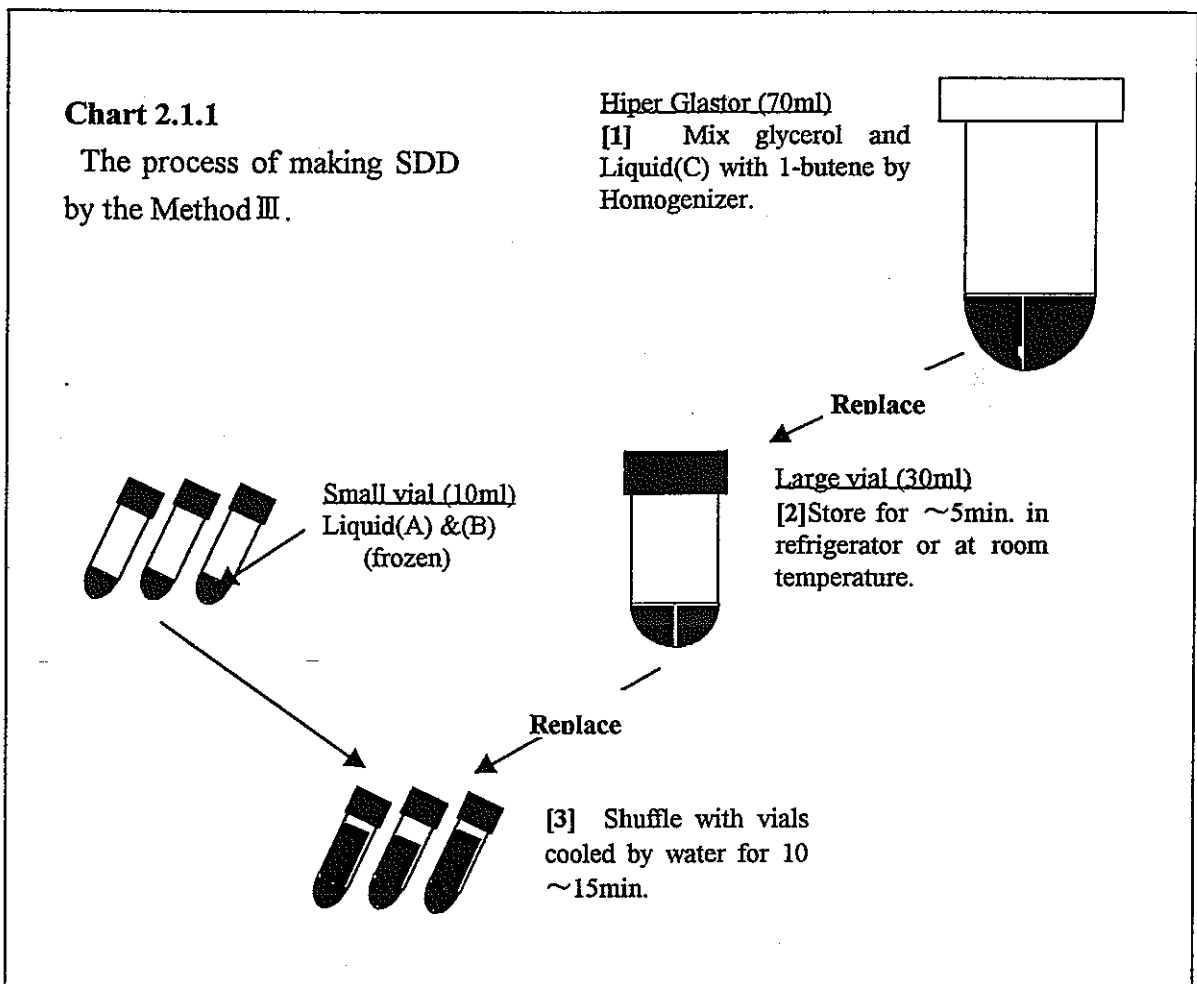
そのまま一晩放置した後にFreon-12を加えて再加圧する。

Freon-12を加えた後、壁面に空洞が生じる場合が多い。空洞の程度はbuteneの量に依存し、極度にその量が多いと、重合の際の発泡過多が原因で大きな空洞が生じることがある。そこで、一昼夜経過後にグリセリンとA・B・C液を混合したものを隙間に流し込んで、隙間を埋めることにした。その結果、非照射時の気泡化による計数(バックグラウンド計数:BG計数)の少ない、安定した検出器ができていたことが多かった。

以上の作成過程を、Chart 2.1.1に示す。

<ポイント>

- (buteneを加える前) グリセリンは粘性が高くなる程度に冷却しておく
- (ガラス容器をミキサーに取り付ける際) 攪拌棒を冷却しておくでbuteneが揮発しにくい。
- (攪拌終了時と小バイアルへ移し替える際) 混合物を手に取り、液滴の存在を確認する。発泡する液滴がはじける程度であれば、液滴数の多い検出器になる場合が多い。



2.1.3 作成方法に対する考察

上手くできた場合、検出器が白濁して見える程多数の液滴を確認できる。
液滴が消失するのは、

- 1) ホモジナイザーによる攪拌を終えてbutene液滴を含む中身を大バイアルに移す際、
- 2) 小バイアルへ移す際、

の2通りが考えられる。各手順の後に液滴の存在を確認することができる。確認の方法は大バイアルから小バイアルに移して、凍ったA・Bが溶解する様子を観測することである。まず、小バイアルに移された液滴のいくつかは、過熱状態を維持できずに発泡してしまう。そして小バイアル中の空間を蒸気で満たすに十分な液滴が気泡化すると、バイアル内部は飽和蒸気圧に達する。このとき気泡が液滴に戻る様子が観測される。

またA、B各液の冷凍により重合時間を10～15分間に延長することができたので、壁面の空洞が生じる割合は少なくなった。しかし、buteneを多く入れすぎた場合には、重合時間が短くなる傾向がある。また冷蔵庫で放置中に発泡する液滴のために、大きな空洞を作る場合があった。これは、隣接する液滴の連鎖発泡による、気泡化によるものと考えられる。程度の差はあれ、空洞が生じることは避けられないので、先に述べたポリマーによる隙間埋めは有効な対策である。

同時に作る試作検出器間の液滴数には、ばらつきがあった。3本の小バイアルに対して、試料を均等になるように移しかえると、中には一見すると良く似た検出器ができて、照射すると発泡数が異なる場合が多かった。使用可能なSDDを作成できる確率は、少なくとも5割以上である。

【補足】 1-butene以外の液体(付録A-2p.: trans-, cis-butene, Freon-12, C_3F_8 , C_4F_8)を検出液体に用いる場合は、液体の沸点・比重を考慮して検出液体の分量を変える必要がある。例えば、1-buteneを基準とすると沸点の高いtrans-, cis-buteneは揮発する量は少ないので、加える量は少な目が適当である。また、支持媒質との比重差が小さい方がバイアル内での液滴空間分布が一様に成り易い。

現在、Freon-12, C_3F_8 のような $-30^{\circ}C$ 程度の低沸点液体での試作には成功していない。1-buteneの場合、室温との差は $25^{\circ}C$ 程度であるが、Freon-12, C_3F_8 では $50^{\circ}C$ にも達することが原因で、液滴の発泡が多くなっているためと考えられる(1-buteneによる作成においても、室温の影響があることが確認されている)。しかしこの発泡を防ぐために、作業環境の温度を $0^{\circ}C$ 程度に低くすると、液滴支持媒質の主成分であるglycerol(融点 $\sim 18^{\circ}C$)が凍ってしまう。

本節で示した試料・作成方法をFreon-12, C_3F_8 のような低沸点液体には適用するためには、何らかの改良を加える必要がある。

2.1.4 中性子照射試験

(1) 中性子照射

Am-Be線源により検出器照射試験を行った。照射位置は線源からの距離を主として20cmとした。中性子束は $2.38 \times 10^3 n/cm^2 \cdot s$ である(Fig.2.1.3では40cm)。音響計数システムにより気泡計数を行った。

【結果】

Fig.2.1.2～2.1.8に、照射結果を示す。Fig.2.1.2では、各チャンネル毎の計数を○印で示してある。なお、図中の[1ch.=1.2 sec]はマルチチャンネルアナライザー(MCA)のドウェルタイムが1.2秒であることを表しておりchannel number \times 1.2secが測定時間となる。

【考察】

Fig.2.1.2,3は、5分間測定の例である。Fig.2.1.2は一定照射に対しほぼ一定の計数率が得られていることがわかる。Fig.2.1.3は計数率が低い例である。総カウント数はFig.2.1.2が～350、3が10程度と少ない。

Fig.2.1.4,5は、測定時間10分の場合である。4はバックグラウンド計数の割合が大きい例で総カウント数は～340である。バックグラウンド計数は、2種類の点線で示した。5は、バックグラウンド計数の割合は小さいが、総カウント数は～150であった。

Fig.2.1.6(a)～(c)は、同じ測定日に3度連続して照射した例である。照射後の気泡を保存したまま次の照射を行っている。3回の照射による生成気泡数から判断すると1000個程度の気泡が生成したことになる。3回とも同じ条件で、同じ時間照射したが一照射当たりのカウント数が、450→250→220と低下している。この計数の低下の原因は、生成した気泡数が多く、検出器の全体積に対する割合が大きくなったせい、SDD内の総液滴数が少なくなったためであると考えられる。照射中の計数率はほぼ一定である。一回の照射によるカウント数を100以内限定する、というような測定方法をとれば、5回程度照射実験可能なSDDである。

Fig.2.1.7(a),(b)は、同一のSDDに(a)測定後7日後に(b)測定を行った例である。これらは、Fig.2.1.6(a)～(c)の例とは異なり、(a)を計数後再加圧して気泡を一度液滴の状態に戻している。Fig.2.1.7(a),(b)は、2回目の方の計数が大きかった。線源からの距離が近いため、設定した距離の誤差が関係している可能性が考えられる。

最後に、同一の測定日に2度照射した例をFig.2.1.8(a),(b)に示す。積算したカウント数は少ないが、各回の照射でほぼ同数のカウントを得た。また、カウント数が50程度であったため、目視による計数が可能であった。目視計数値は、(a),(b)ともにAE計数と同程度であった。これらFig.2.1.6,7は、再加圧後もその前と感度に変化しなかった例である。

100以上の計数の場合には目視計数が困難となり、50程度が目視による気泡確認の限界である。

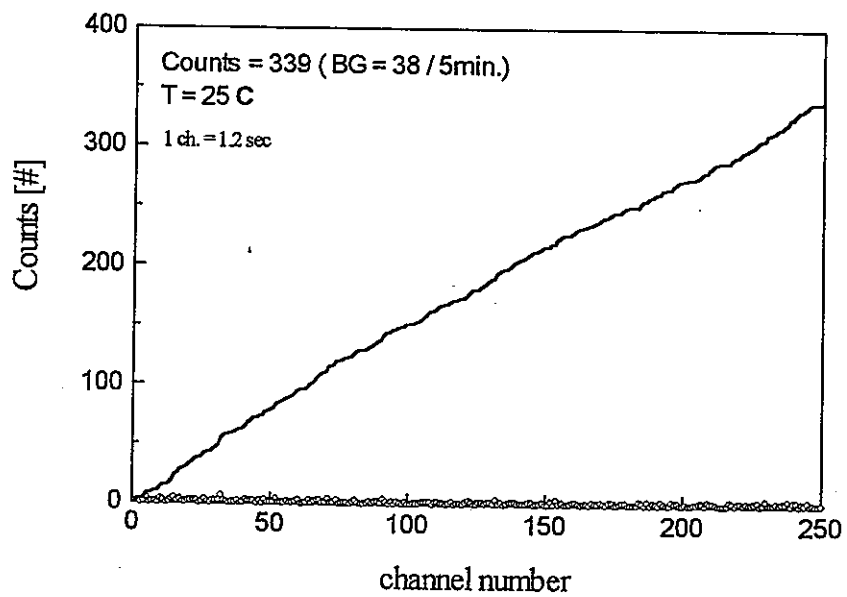


Fig.2.1.2計数特性:良好な計数特性の例(計数率が一定。B.G.も少ない。)

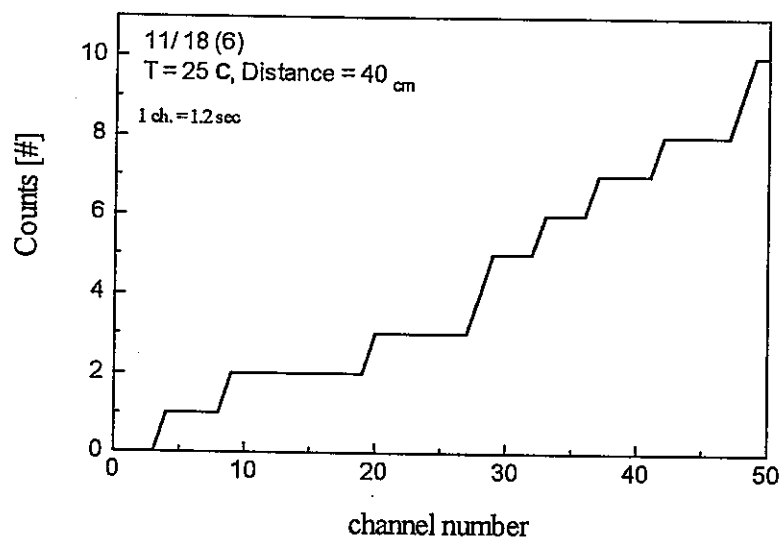


Fig.2.1.3計数特性:不良な計数特性の例(総計数が少ない。)

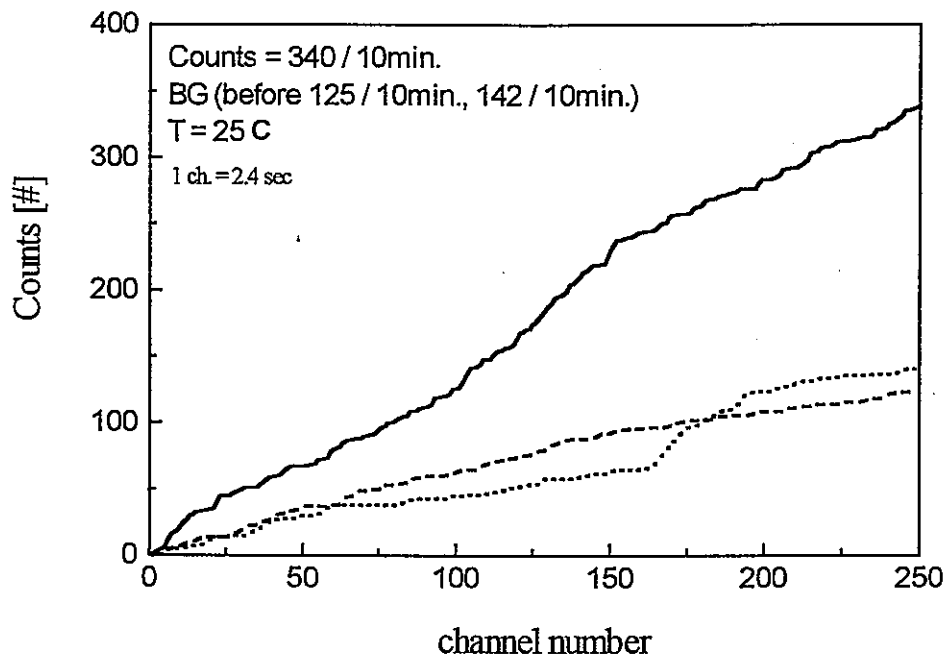


Fig.2.1.4 計数特性の例 (B.G.が大きい。)

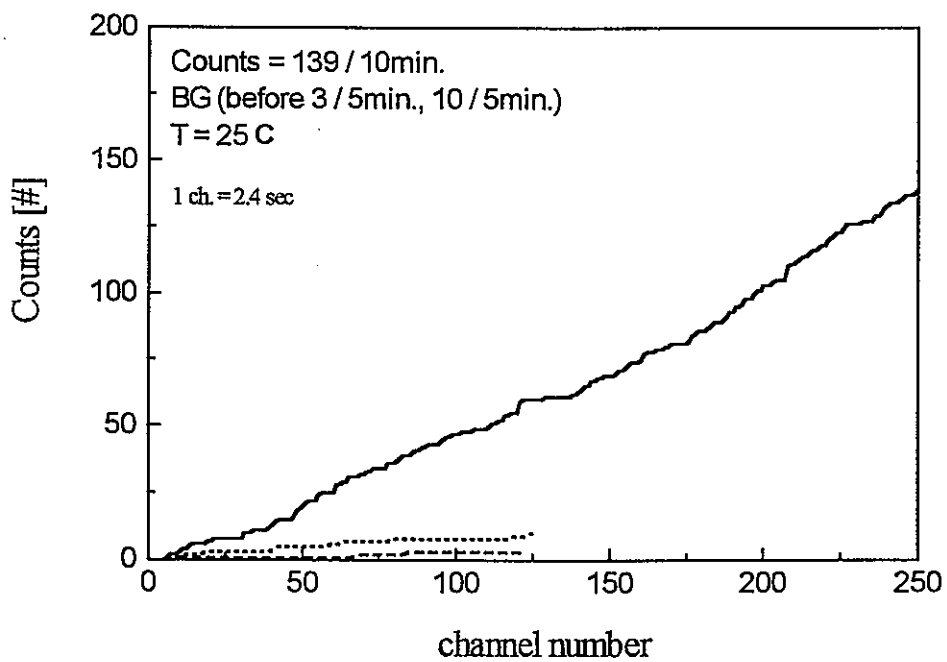


Fig.2.1.5 良好な計数特性の例 (計数率は一定。B.G.も小さい。)

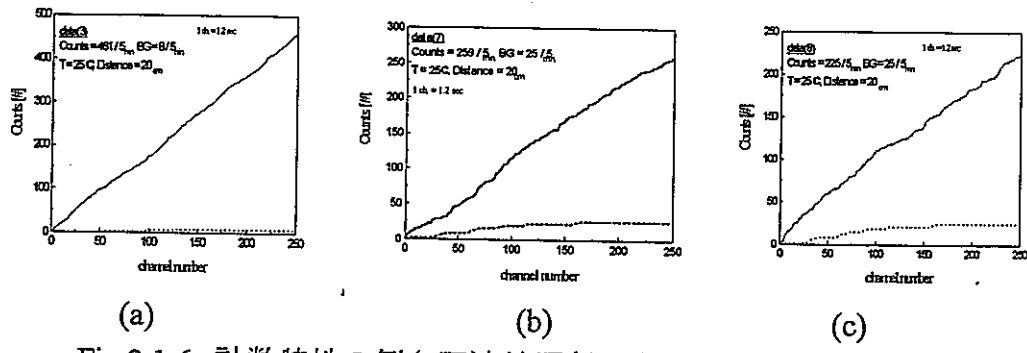


Fig.2.1.6 計数特性の例 (3回連続照射。計数率は一定。B.G.も小さい。)

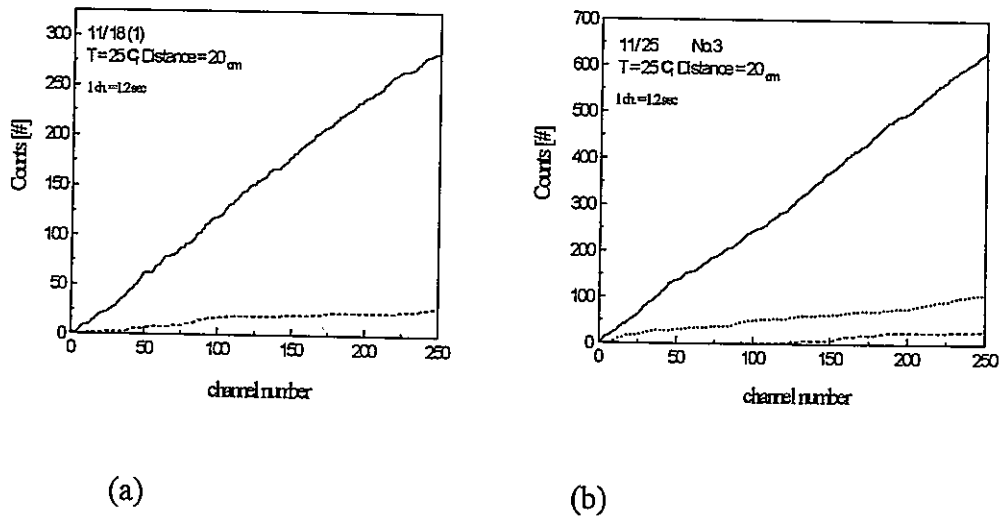


Fig.2.1.7 計数特性の例 ((b)は(a)測定後再加圧、7日後測定。)

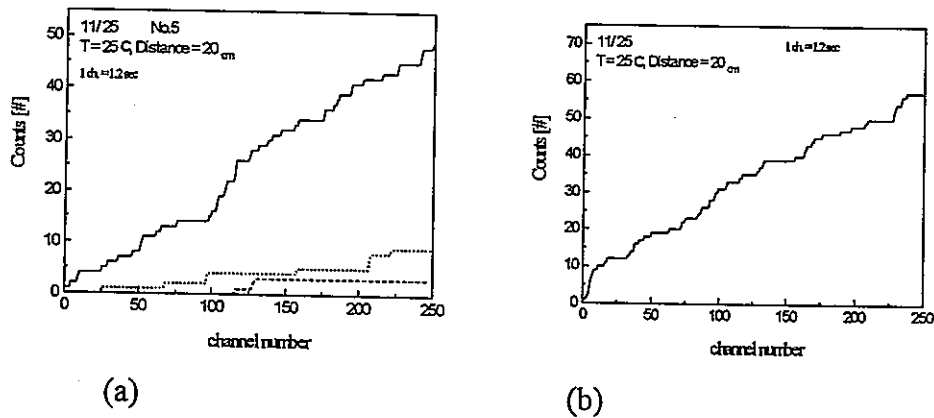


Fig.2.1.8 計数特性の例 ((a)測定後同日測定。)

【参考文献】

2.1)市販SDDに関する文献をいくつか示しておく。

- H. Ing, *The status of the bubble-damage polymer detector* : Nucl.Tracks, 12, 1-6, 49-54 (1986)
- H. Ing and H. C. Birnboim, *Bubble-damage polymer detectors for neutron dosimetry* : presented at 5th symposium on Neutron Dosimetry, Neuherberg, Germany 17-21 (1984)
- BTI, Bubble Technology Industries, brochures (Hwy. 17, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0)

2.2)澤村晃子、山崎初男：中性子検出器の研究開発、動力炉・核燃料開発事業団委託研究報告書(1995)

2.3)津田修一、卒業論文p.28-29

第3章 過熱液滴型検出器による線量評価法

SDDによる線量評価法には気泡計数による方法と検出液体の蒸発による体積変化に基づく方法がある。液滴計数法には目視による方法と、液滴が蒸発する際の発生音を電氣的に計数する方法とが用いられている。前者や体積変化に基づく方法は受動型(passive)、後者は能動型(active)、或いは nonelectronic法とelectronic法と呼ばれている。

以下にこれらの方法とその例を示し、次に本研究で行っている方法を述べる。

3.1 受動型計数法

3.1.1 気泡目視計数

Ing型SDDに適用される。最も簡単な方法であるので、簡便な個人線量計の場合に有用である。ただし、ダイナミックレンジが小さく統計誤差が大きくなる。目視で計数できる気泡数は ~ 30 個前後であるので、標準偏差が $\sim 20\%$ 程度になる。誤差を減らすには、数本の検出器を同時に用いるか、測定を何回か行う必要がある。

3.1.2 気泡化による体積変化に基づく方法

Apfel型SDDに適用される。Apfelが最初に提案したSDDの線量評価法は液滴の蒸発により検出部の体積が増加し、検出部の浮力の増加による検出部位置の変位から線量を評価するものであった。^{3.1)} その後も同じ原理に基づく方法を発表しているので紹介する。NeutrometerTMとNeutrometerTM-HDと呼ぶ低線量用および高線量用線量計はそれぞれ直径 $100\ \mu\text{m}$ の液滴8000個、直径 $60\text{--}70\ \mu\text{m}$ の液滴20000個を含み、液滴の蒸発によりピストンやピペットの液面が押し上げられ、その変位を直読するようになっている。 $5\ \mu\text{Sv}\text{--}8\text{mSv}$ 、 $0.5\text{mSv}\text{--}50\text{mSv}$ 範囲の線量測定を行ったと報告されている。^{3.2)}

3.2 能動型計数法

気泡発生音を検出する方法なのでApfel型・Ing型両方のSDDの計数に適用できる。液滴直径を小さくし液滴数を多くするとすると、ダイナミックレンジは大きくなる。検出器周辺の雑音の影響を除去するために同時計数回路を利用したり、発生音のセンサー出力特有の形状に着目し発生音信号と雑音を弁別するマイクロプロセッサを備えた計数システム等が利用されている。^{3.3)3.4)}

3.3 本研究で用いた計数法

本研究では能動型計数法を用いている。発生音センサーにはAE (acoustic emission) 用センサーとして市販されている検出器を用いている。AEセンサー出力は単純なパルス波形でないので、1発生音-1パルスとして計数回路に入力するには波形整形等の処理が必要である。これまではその処理にデジタルオシロスコープ(DSO)の内蔵機能を利用していた。しかし、その機能はソフト的な処理を含むため処理時間が長くなり、また計数率にも制限があった。今回、後に述べる中性子感度のエネルギー依存性の実験(東北大学にて照射)の際に試用した。

使用したAEセンサー、センサー用前置増幅器、センサー支持法等は昨年度までと同じである。

【信号処理システム】

Fig.3.3.1-1に、気泡生成の音響信号波形(典型的な例)と、その整形信号を模式的に示す。[a]はAEセンサー出力信号で、正および負のディスクリミネーターレベルを点線で示してある。[b]はそれぞれ正、負極側のディスクリミネーター出力である。[d]は負極側の出力を反転させて、正負のディスクリミネーター出力を合成したものである。こうして、信号は1連のパルス列に変換される。1発生音信号の終了はパルス列のパルス間隔で判定した。パルス間隔が T_{sp} 以上になると、新しい発生信号が到来したものと判断した。[c]の出力はこの判定に基づく計数パルスである。この出力は[d]と共に立ち上がり、[d]パルス列のパルスが T_{sp} 以上経過しても到来しないときに終わる。 T_{sp} 以上離れてパルスが到来すると新たな計数パルスが立ち上がる。それ故計数用パルス幅の最小値は T_{sp} であり、 T_{sp} 以上近接した発生音信号は数え落とす。Fig.3.3.1-2はシステムのブロック図である。

●ディスクリミネーターレベルの設定:これまでDSOで判別したときは、正極に+40mV、負極に-40mVにレベルを設定し、それ以下はノイズとみなしていたことを参考にして、正極側に40mVとしたが、最終調整の時確認したところ、30mV程度であった。30mV程度以上であれば、経験的にノイズを拾うことは少ない。

● T_{sp} 値の設定:これまでに得た高計数率の値を基準にして、数え落しがないように設定した。具体的には、5分間の計数で600個計数する場合を考えた。この場合、計数率は2#/sである。気泡の発生は確率現象であるため、この計数率の10倍の計数率でも数え落しがないように設定した。これより $T_{sp}=50\text{msec}$ となる。この値を上限値として、この値以下に時定数を設定することにした。実際には、一つの波形が終了するまでの時間がオシロスコープで観測する限り、10msec程度であるため、 T_{sp} を10msecとした*。

この回路の最大の利点は、信号処理を電子回路上で行うため、DSOの弁別機能以上の速い信号にも対応し、気泡計数の数え落としが少ないことである。模擬的な信号入力テストを経た後、実際の気泡の信号によるテストを行って回路とDSOの判別の違いを調べた。~100/5min.以上の計数では10%程度回路の計数が多く、それ以下の

計数率ではほぼ同様の計数を確認した。

なお、回路の設計・製作は北大原子炉シミュレータ研究室の村井郁夫氏によるものである。持ち運びにも便利な250×170×50mm(本体のみ)の小型・軽量の回路である。

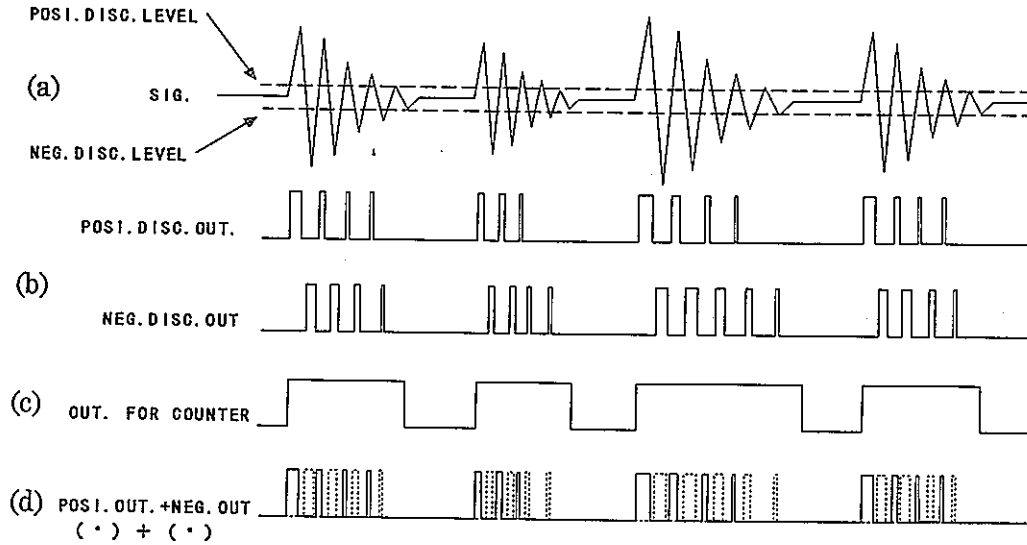


Fig.3.3.1-1 AEセンサー出力信号から計数パルス発生までの過程

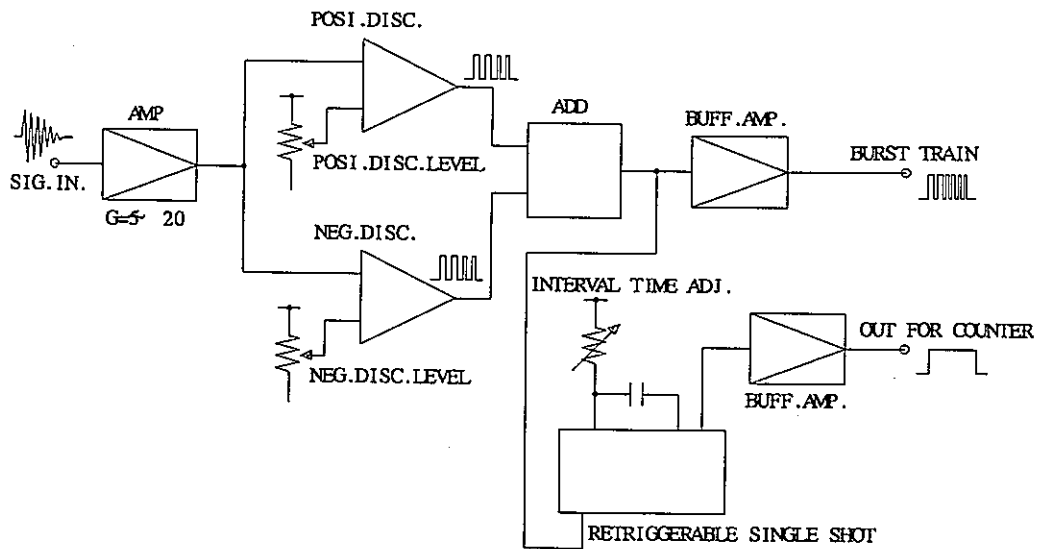


Fig.3.3.1-2 信号処理システムのブロック図

* 10msecを超える信号が得られることもある。しかしその場合でも、20msec以内で収束するものが大半である。

【参考文献】

- 3.1) R.E. Apfel: NIM, 162 (1979)
- 3.2) R.E. Apfel ; Rad. Prot. Dos. 44, 1/4, 343-346, 1992
- 3.3) F.d'Errico et al; Rad. Prot. Dos. 70, 1-4, 103-108 (1997)
- 3.4s) R.E. Apfel et al; Health Phys. Suppl. 64, S49 (1993)

第4章 過熱液滴型検出器の中性子検出感度とその応用

本章では中性子検出感度の温度依存性と圧力依存性に関する計算と実験を示す。温度依存性はこれまでも行ってきたが、本年度は単色中性子について実験した。圧力依存性は1気圧以下の範囲について実験している。

SDDの検出感度は圧力の減少と共に増加する。これまで感度の圧力依存性についてはあまり関心が持たれてこなかった。SDD使用環境圧力が大きく変化することは考えにくかったためであろう。

しかし、減圧下でSDDの感度は増加し、また中性子検出しきい値は低下し、検出エネルギー領域は広がる。更に、検出器動作の解明の上からは、圧力依存性に関し計算と実験の比較を行うこと、また有効エネルギー領域に関するパラメータの推定などを行うことができる。

B. White等^{4,1)}はエネルギー依存中性子検出感度が圧力の関数になることに着目し、BD-100Rの圧力を変化(加圧)して中性子スペクトルを推定する方法を検討している。これが唯一圧力依存性に関する報告である。

4.1 圧力依存性実験

SDD照射実験は、主に北海道大学工学部未臨界集合体実験室(北大未臨界実験室)でAm-Be線源を用いて行った。実験体系、線源、線量評価等は昨年度と同じなので、ここには示さない。

(1) 照射結果

Fig.4.1.1に、照射時間(チャンネル数 \times 1.2sec)に対する計数を示す。図の測定では、一本のSDDについて圧力を361,461,562,661Torrと変化させて4回照射している。緩やかな計数の増加はB.G.によるもの、急峻な増加は中性子照射による。

照射時の(計数増加率/中性子束)が、指示されている圧力時の感度に相当する。

Fig.4.1.2に、B.G.計数率を差し引いた、正味の計数率と圧力の関係を示す。温度を25℃とした場合である。B.G.計数は照射の前後に行い、照射中のB.G.には前後の計数の平均値を用いた。図中の日付は測定日を表し、これら各SDDの計数値の平均値を実線で表している。360Torr以上の圧力下では、同一SDDにつき100Torr間隔で3~5点引き続き測定することができたが、160,260TorrではB.G.が計数に与える寄与が大きくデータ取得が難しい場合が多かった。

Fig.4.1.3に、中性子照射時の総カウント数に対する、B.G.カウントの比を示す。特定の圧力での感度で規格化した実験および計算感度をFig.4.1.4(a)-(f)に示す。

(2)考察

Fig.4.1.2は規格化していない感度で各SDDの感度にばらつきがあることが分かる。相対的にデータ数が多いこと、B.G.の圧力依存性等より、360Torr以上の圧力範囲に対する結果の信頼性は、360Torr未満のデータよりも高いと考えられる。計算結果と比較する際360Torr以上の圧力範囲のデータに注目して推定した**b**値を以下の表にまとめた。

Table 4.1.1 The estimated *b* values

Pressure normalized sensitivity [Torr]	<i>b</i> values
360	10~14
460	10~14
560	12~14
660	12~16

表中の値は昨年行った1-butene-SDDの温度依存性実験と計算の比較で推定された値とほぼ一致する。

360~760Torrの圧力範囲では、B.G.計数の圧力依存性が小さいため、依存性の大きい360Torr以下の圧力範囲よりも多くのデータを取得できた。検出器壁際に生じる空洞に面する支持媒質の表面近傍に存在する液滴の自発的発泡が、高いB.G.計数率に関わっていると考えられる。空洞は、SDD作成過程で生じるため、第2章1節で述べた作成方法を更に改良することにより、より高精度で低圧力下までの感度測定が可能になると考えられる。

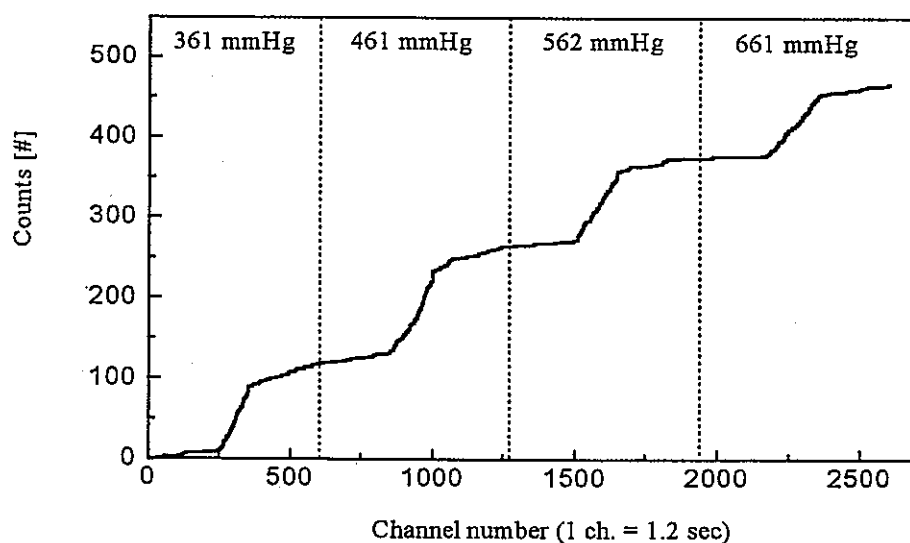


Fig.4.1.1 圧力を変化したときの計数特性

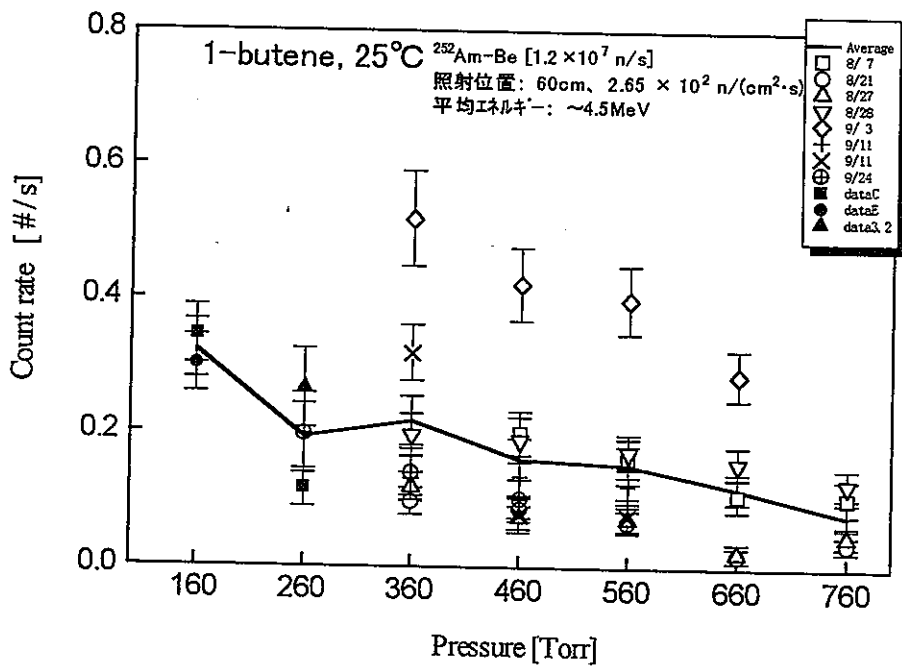


Fig.4.1.2 B.G.を差し引いた計数率と圧力の関係

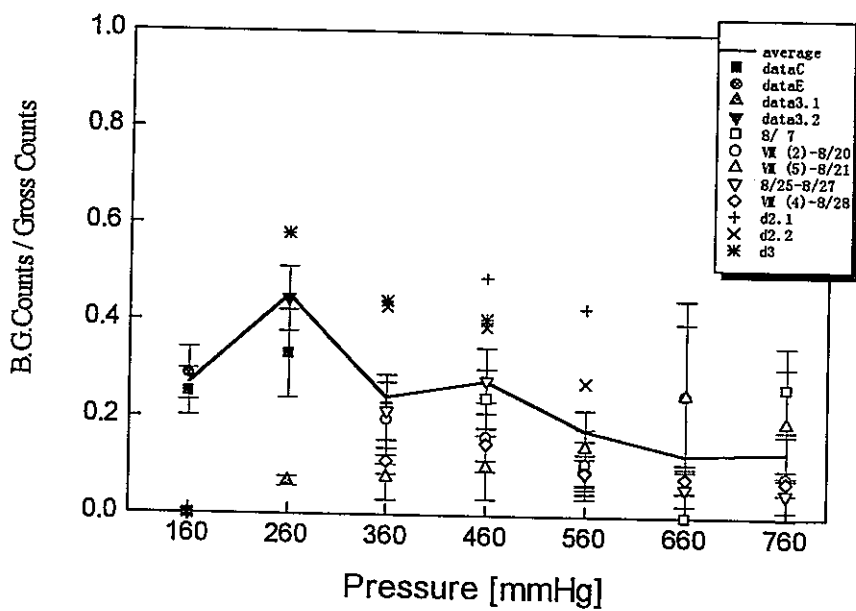
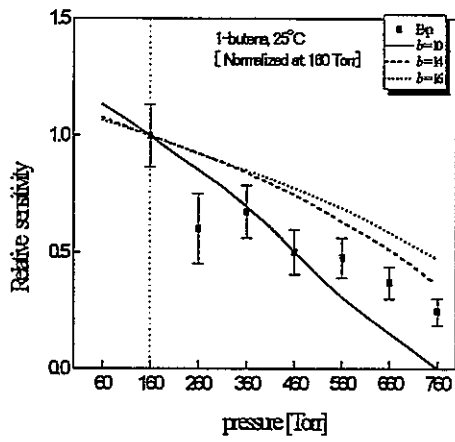
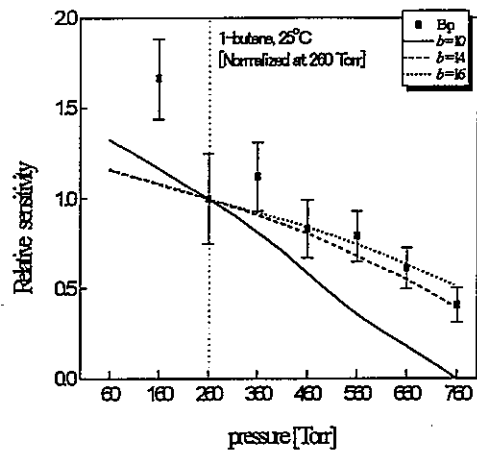


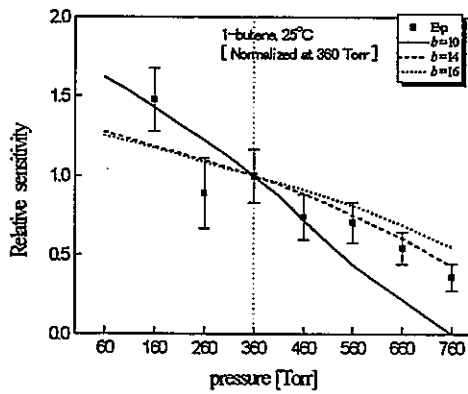
Fig. 4.1.3 照射時におけるグロス計数に対する B.G.の比



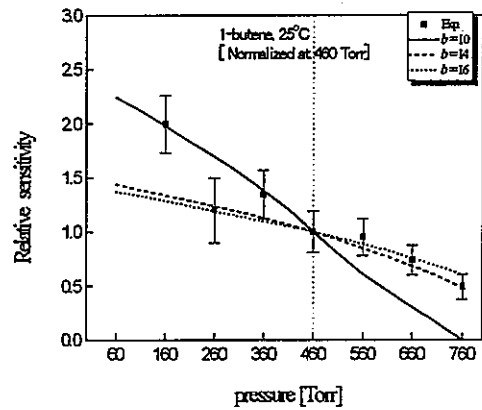
(a)160torrで規格化



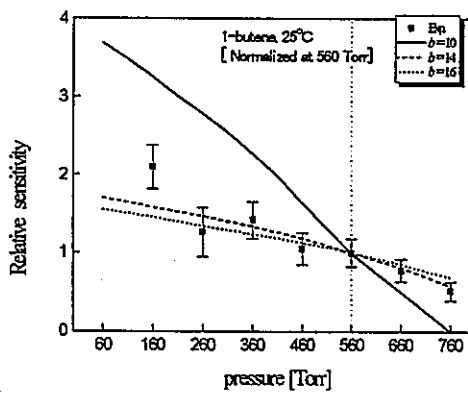
(b)260torrで規格化



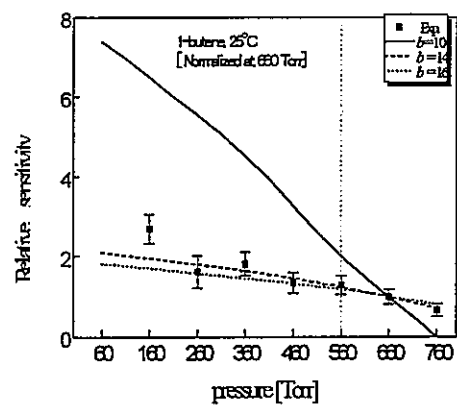
(c)360torrで規格化



(d)460torrで規格化



(e)560torrで規格化



(d)660torrで規格化

Fig.4.1.4 計算と実験の比較

4.2 エネルギー依存性と温度依存性

単色中性子照射は、東北大学工学部・FNL(Fast Neutron Laboratory)で行なった。中性子エネルギーは、0.55・1・2・5・15MeVで、温度・エネルギー両依存性について検討した。

(1) 実験条件の決定

これまでのデータから推定されるb-値を用いて計算した検出感度のエネルギー依存性から、感度が急激に変化する中性子エネルギーの範囲は、Table 4.2.1のようになる。

Table 4.2.1 各温度における、検出感度のしきいエネルギー範囲 (推定値)

温度	中性子エネルギー範囲
26°C	2.5~7MeV
30°C	1.5~4MeV
35°C	0.5~2MeV
40°C	0.1~1MeV

0.25、0.55、1、2、5、15MeVのエネルギーを持つ中性子照射から、中性子検出エネルギーしきい値を検討するには、0.25、0.55、1、2MeVの4点がおおよそ含まれる、温度を35°Cあるいは40°Cに設定するのが適当である。40°Cの設定温度ではバックグラウンド計数の増加が予想されるので、30°Cあるいは35°Cで実験を行うのが適当である。

実際に行った実験条件をTable 4.2.2に示す。

Table 4.2.2 実験条件・最終結果

Date		Neutron energy [MeV]	Temp.[°C]	Neutron ϕ [n/cm ² ·s]	time[min.]
12/8 (Mon.)	エネルギー依存性	15, 2, 1 MeV,	30°C or 35°C	~100	5~20
	温度依存性	"	25~40°C	~100	5~20
12/9 (Tue.)	エネルギー依存性	1, 0.55, 0.25MeV	30°C or 35°C	~100	5~20
	温度依存性	"	25~40°C	~100	5~20

(2) 実験体系

Fig.4.2.1に、FNLの平面図を示す。^{4,2)}30度のポートで照射を行なった。Table4.2.3に、ターゲットから放出される中性子のデータを示す。

計数方法は、気泡生成音をA.Eセンサーで取り込むまでは4. 1で行なった実験と同様であるが、その後の信号処理は3. 3. 1で説明した回路を用いて行なった。

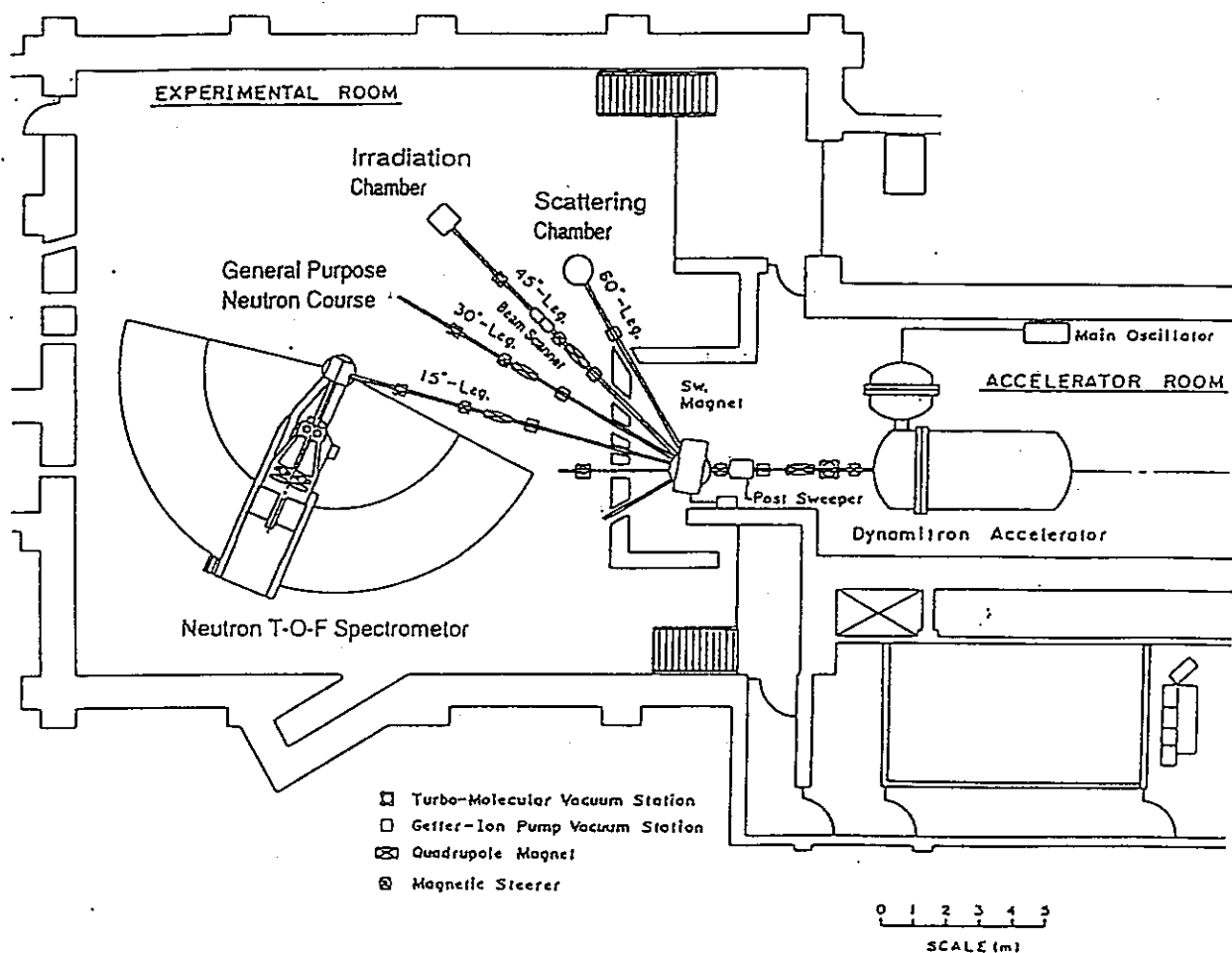


Fig.4.2.1 The facility of Fast Neutron Laboratory (FNL)

Table 4.2.3 Neutron sources

Neutron Energy [MeV]	Source reaction	Target/backing	Energy spread
0.55	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	LiF/Pt	~50keV
1.0	$\text{T}(p,n){}^3\text{He}$	T-Ti/Cu	~100keV
2.0	$\text{T}(p,n){}^3\text{He}$	T-Ti/Cu	~80keV
5.0	$\text{D}(d,n){}^3\text{He}$	$\text{D}_2\text{gas/Pt}$	~250keV
15	$\text{T}(d,n){}^4\text{He}^a$	T-Ti/Cu	~500keV

^a D_3^+ beam(1.5MeV)

(3) 照射結果

No.[1]～[5]のSDDについて照射実験を行った。の実験条件を以下の表にまとめる。

SDD No.	Fig. No.	Energy & temperature condition	Notes
[1]	Fig.4.2.2	2 MeV : 25・30・35・40°C	Temperature dependence
[2]	Fig.4.2.3	0.55 MeV : 25・30・35・40°C	//
[3]	Fig.4.2.5	35°C : 0.55・1・5 MeV	Energy dependence
[4]	Fig.4.2.6	35°C : 1・2 MeV	//
[5]	Fig.4.2.7	35°C : 2・15 MeV	//

それぞれのSDDについて異なるエネルギー・温度条件下で照射した。例えば、SDD No.[1]に対し、2MeVの中性子照射を25°C～40°Cの4点について行ったことを示している。同様に、SDD No.[3]では35°Cでエネルギー0.55・1・5MeVの中性子を照射したことを表わす。

Fig.4.2.2、4.2.3に、SDD No.[1]、[2]の2MeV、0.55MeVにおける感度の温度依存性を示す。図には、40°Cでの実験値によって規格化した計算感度も示してある。図中の、 K/Kc は、実験で得た感度 K と、計算感度 Kc の比である。

計算感度は、半径20 μ mの液滴一個 (1-butene 2.0×10^{-8} g) 当たりの感度である。b=10～16の場合の計算感度を示した。もし試作SDD内の液滴半径が20 μ mであるとするとこの感度比はSDD内の総液滴数を表わす。

Fig.4.2.4はFig.4.2.2にFig.4.2.3を2.4倍して重ねて示したものである。2.4倍の変換はSDD[1]、[2]の液滴数の差を補正するもので、補正係数としてに推定液滴数比 $\{(K/Kc)_{2MeV} / (K/Kc)_{0.55MeV}\}_{b=14} = (4.11 \times 10^4 / 1.71 \times 10^4) = 2.40$ を用いた。

Fig.4.2.5,6,7に感度のエネルギー依存性を示した。それぞれSDD No.[3],[4],[5]の実験感度と、5MeV、2MeV、15MeVの実験感度規格化したで計算感度を示した。また、表示されている実験感度の誤差は、計数率の統計誤差である。。

(4) 考察

以下Fig.4.2.2から順に考察を行う。

[温度依存性①: Fig.4.2.2] エネルギー2MeVとし、測定は25°Cから5°C間隔で行なった。温度が低いほど計数率が低かったため、温度が低いほど誤差は大きい(25°C: ~30%、40°C: ~7%)、25°Cでも感度があることがわかる。推定液滴数は各b値についていずれも $\sim 10^4$ 程度である。市販SDDを製作しているBTI社の試算によると、同様のサイズのバイアル(80mm×15mm ϕ : 10ml)中の総液滴の推定値が、 $10^4 \sim 10^5$ 個とされていることを考慮すると、この値は妥当であると考えられる。

Table.4.2.5に、実験で得た4点での感度のうち、最も誤差の小さい40°Cでの実験値から推定した液滴数、 4.11×10^4 を用いて実験感度を液滴当たりの感度 K_{CE} に換算し計算感度との比較を示した。 $b=14$ とした場合、 K_C / K_{CE} は、 K_C が0の25°Cの場合を除くと、～50%の範囲で実験値と計算値が一致することがわかる。

Table.4.2.5 Fig.4.2.2データ [推定液滴数 $\sim 4.11 \times 10^4$ at 40°C]

Exp. No.	temp. [°C]	$K_C (b=14)$	K	K_{CE}	K_C / K_{CE}
[2]	25	0	7.46×10^{-5}	1.82×10^{-9}	0
[3]	30	3.97×10^{-9}	1.89×10^{-4}	4.60×10^{-9}	0.86
[6]	35	9.47×10^{-9}	2.50×10^{-4}	6.10×10^{-9}	1.55
[7]	40	1.25×10^{-8}	5.13×10^{-4}	1.25×10^{-8}	1

K_C : 液滴一個当たりの感度(計算)、 K :感度(実験)、
 K_{CE} : 40°Cでの推定液滴数から求めた、液滴一個当たりの感度

[温度依存性②: Fig.4.2.3] エネルギー0.55MeV、35°Cから40°Cで測定した。エネルギーが低く感度が低くなり総計数が少なかった。40°Cで照射中に、20チャンネル付近で集団的な発泡があり、1チャンネル中に13個の気泡を計数した。Fig.4.2.3は、この集団的な発泡を考慮していない。 $b=14$ の計算と良い一致を示し、Table.4.2.6から35°Cでの K_C / K_{CE} は0.77であることがわかる。集団的な発泡を考慮した結果をTable.4.2.7に示す。実験値が小さくなるため $b=14$ での推定液滴数は減少し($1.71 \times 10^4 \rightarrow 1.41 \times 10^4$)、 K_{CE} は大きくなった。その結果、 K_C / K_{CE} は減少したが、40%程度の範囲で実験値と計算値が一致した。

Table.4.2.6 Fig.4.2.3データ [推定液滴数 $\sim 1.71 \times 10^4$ at 40°C]

Exp. No.	Temp. [°C]	$K_C (b=14)$	K	K_{CE}	K_C / K_{CE}
[6]	35	4.05×10^{-10}	9.04×10^{-6}	5.29×10^{-10}	0.77
[7]	40	7.97×10^{-9}	1.36×10^{-4}	7.97×10^{-9}	1

K_C : 液滴一個当たりの感度(計算)、 K :感度(実験)、
 K_{CE} : 40°Cでの推定液滴数から求めた、液滴一個当たりの感度

Table.4.2.7 Fig.4.2.3補正データ [推定液滴数 $\sim 1.41 \times 10^4$ at 40°C]

Exp. No.	Temp. [°C]	$K_C (b=14)$	K	K_{CE}	K_C / K_{CE}
[6]	35	4.05×10^{-10}	9.04×10^{-6}	6.41×10^{-10}	0.63
[7]	40	7.97×10^{-9}	1.12×10^{-4}	7.97×10^{-9}	1

[温度依存性③: Fig.4.2.4] Fig.4.2.4に0.55MeVの結果を2MeVの結果とともに示した。この図は、もし、40°Cにおける測定感度が計算値と一致しているならば、他の実験値およびその他のパラメータがどのようになるかを示している。

感度は高温になると、臨界エネルギーが減少するためイオンの気泡生成効率(中性子誘発イオンが気泡を生成する確率)が上昇する。ある程度の温度 $T_m(E_n)$ 以上になると効率は100%になり、感度は温度に依存しない。この温度領域では、感度 E_n 依存性は、中性子断面積で決まることになる。Fig.4.2.3より40°Cはほぼ $T_m(E_n)$ に近いことがわかり、40°Cの感度計算値のパラメータ b 値への依存性は小さい。 $E_n=2\text{MeV}$ の場合 $b=12\sim 14$ に対し、推定液滴数は $4.50\times 10^4\sim 4.03\times 10^4$ 程度の違いである。これよりSDD[1]液滴数は $\sim 4\times 10^4$ と推定される。これを用いると、SDD[2]液滴数は $\sim 1\times 10^4$ となろう。

以下のエネルギー依存性実験はすべて35°Cで行なった。

[エネルギー依存性①: Fig.4.2.5] 照射順序は、1MeV→0.55MeV→5MeVで、照射までの時間は ~ 3 時間と ~ 6 時間であった。検出器保存時の圧力(フロン)の蒸気圧を利用)を解放してから、5MeVの照射を開始するまでに9時間程度経過していた。そのため、1MeVおよび0.55MeVの照射によって生じた気泡は成長し、5MeVを照射する時点では成長した気泡は扁平に変形していた。そのため、SDD自体の感度低下が予想されたが、3点中最も計数総数は大きく、計数特性も良好であった。

実験で得たこれら3点のデータと計算感度を比較すると、 $b=14\sim 16$ が良い一致を示している。Table.4.2.9の $b=14$ の計算によると、計算感度が0になる0.55MeVを除き実験と計算とは $\sim 40\%$ 以内で一致している。

Table.4.2.9 Fig.4.2.5データ [推定液滴数 $\sim 4.67\times 10^4$ at 5 MeV]

Exp. No.	E_n [MeV]	$K_C (b=14)$	K	K_{CE}	K_C/K_{CE}
[5]	0.55	0	3.70×10^{-5}	7.92×10^{-10}	0
[1]	1	3.44×10^{-9}	2.50×10^{-4}	5.35×10^{-9}	0.64
[9]	5	3.23×10^{-9}	1.51×10^{-4}	3.23×10^{-9}	1

K_C : 液滴一個当たりの感度(計算)、 K :感度(実験)、
 K_{CE} : 5MeVでの推定液滴数から求めた、液滴一個当たりの感度

[エネルギー依存性②: Fig.4.2.6] 照射は、2MeV→1MeVの順に約1時間の間隔を空けて行なった。Fig.4.2.5と同様に、 $b=14\sim 16$ で実験と計算が一致した。

Table.4.2.10 Fig.4.2.6データ [推定液滴数 $\sim 4.82\times 10^4$ at 2 MeV]

Exp. No.	E_n [MeV]	$K_C (b=14)$	K	K_{CE}	K_C/K_{CE}
[1]	2	9.48×10^{-9}	4.57×10^{-4}	9.48×10^{-9}	1
[9]	1	3.44×10^{-9}	2.04×10^{-4}	4.23×10^{-9}	0.81

K_C : 液滴一個当たりの感度(計算)、 K :感度(実験)、
 K_{CE} : 2MeVでの推定液滴数から求めた、液滴一個当たりの感度

[エネルギー依存性③: Fig.4.2.7] 15MeVを照射し、約9時間後に2MeV照射を行なった。2MeV照射においてバックグラウンド計数の割合はグロス計数に対して～75%であった。これは15MeV照射後、約9時間室温中に放置したために、感度が低下したためであると考えられる。Table.4.2.11に15MeVの感度で規格化した結果を示す。2MeVで K_C/K_{CE} が24となっており、実験値と計算値がかけ離れていることがわかる。

Table.4.2.11 Fig.4.2.7データ [推定液滴数 at 15 MeV $\sim 6.26 \times 10^4$]

Exp. No.	E_n [MeV]	K_C ($b=14$)	K	K_{CE}	K_C/K_{CE}
[1]	15	2.86×10^{-9}	1.79×10^{-4}	2.86×10^{-9}	1
[9]	2	9.48×10^{-9}	2.50×10^{-5}	3.99×10^{-10}	24

K_C : 液滴一個当たりの感度(計算)、 K : 感度(実験)、
 K_{CE} : 15MeVでの推定液滴数から求めた、液滴一個当たりの感度

(補足) 同一のSDDでも照射により生成気泡数が増加するほど、当然液滴数は減少していく。しかし、総液滴数が $\sim 4 \times 10^4$ 程度あれば、2000個程度気泡生成した場合でも5%程度の減少である。本実験を通じて、総生成気泡数は最大で ~ 1000 個程度以下であると推定されるので、照射による液滴数の減少分は十分小さい。

(5)まとめ

本実験により、単色中性子に対する感度の

- 温度依存性、
- エネルギー依存性、

を検討した。温度依存性は、2MeVと0.55MeVの2点について行うことができ、計算との比較によりパラメータ $b=14\sim 16$ 程度であるとの推定を得た。

Harperの報告によると、 ^{252}Cf 線源及び減速 ^{252}Cf 線源に対するFreon-12 (CCl_2F_2 : 密度 1.33g/cm^3)の b 値は4.3である^{4,3)}。本研究の結果はHarperの b 値の3倍程度である。 b 値の差異等の実験的検討には、動作特性の安定したSDDの作成、圧力依存性測定では 10°C 付近での感度測定(感度の圧力依存性は低温で大きい)、および単色中性子照射ではより多くのデータ取得が必要である。また、臨界エネルギー、臨界半径等に関する理論についても検討を要すると考えられる。

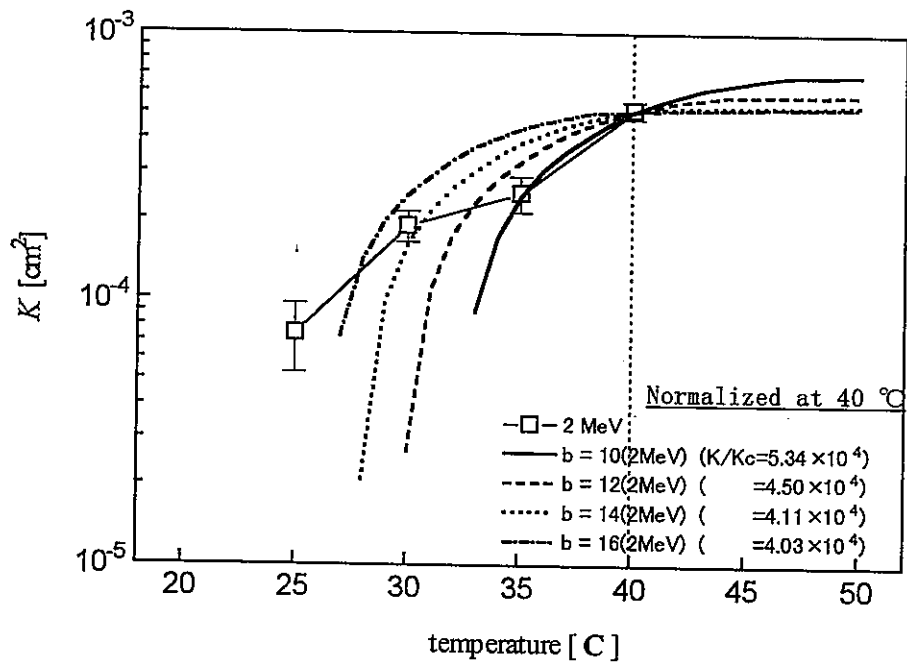


Fig.4.2.2 2MeV中性子照射、40 °Cで規格化した感度

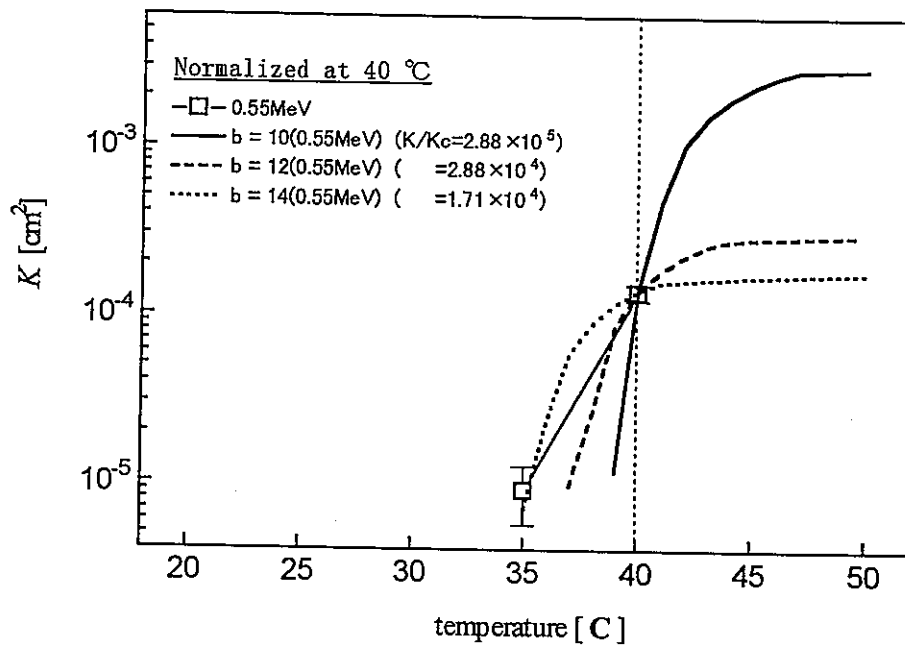


Fig.4.2.3 0.55MeV中性子照射、40 °Cで規格化した感度

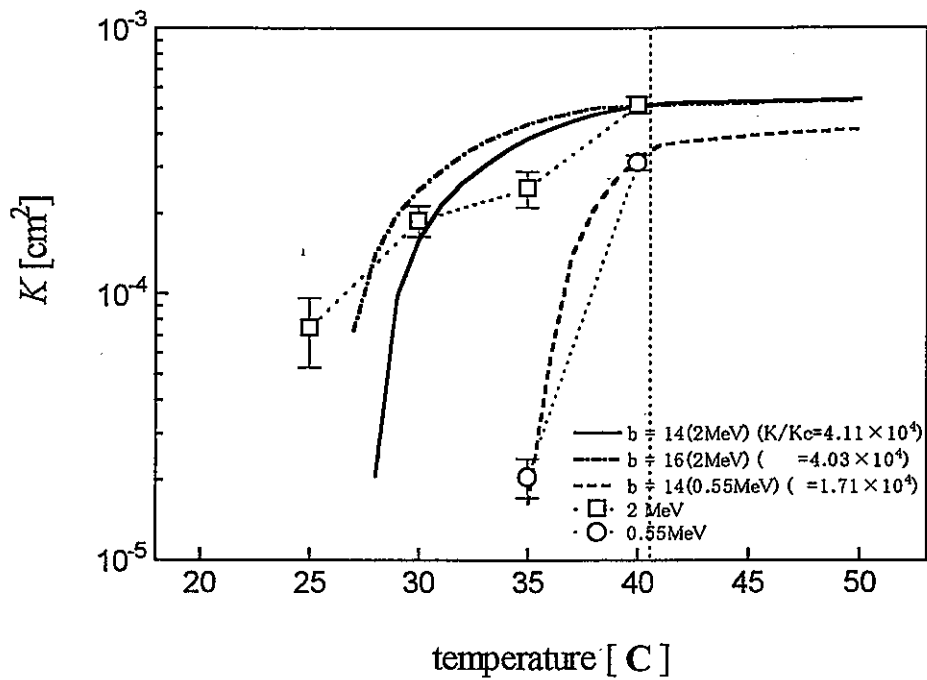


Fig.4.2.4 0.55MeVおよび2MeV中性子照射。2MeV中性子照射は実験値の絶対値。0.55MeV感度については本文参照。

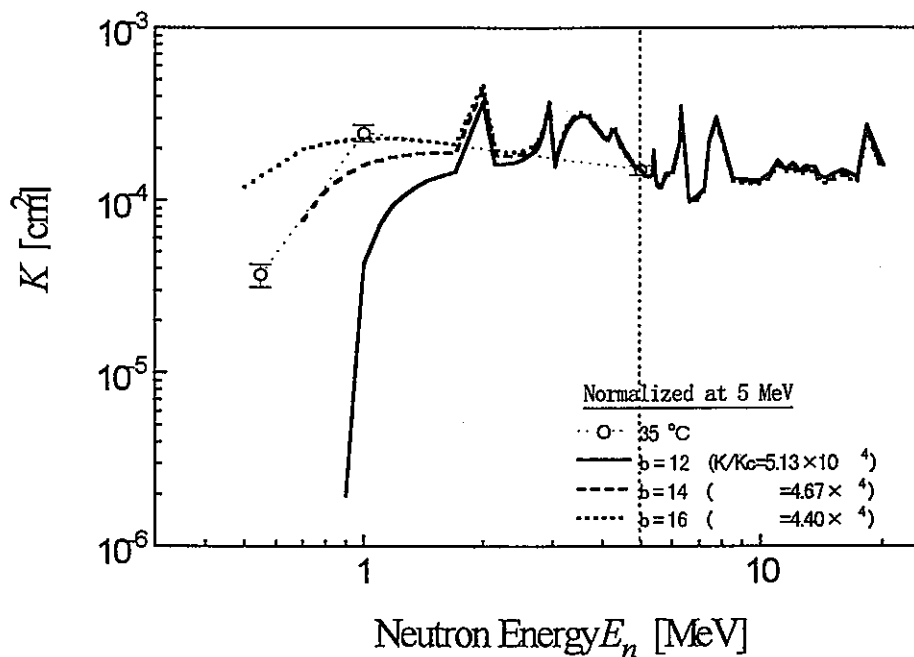


Fig.4.2.5 35 °Cでの測定値。実験値は絶対値。計算値は5MeVでの実験値で規格化している。

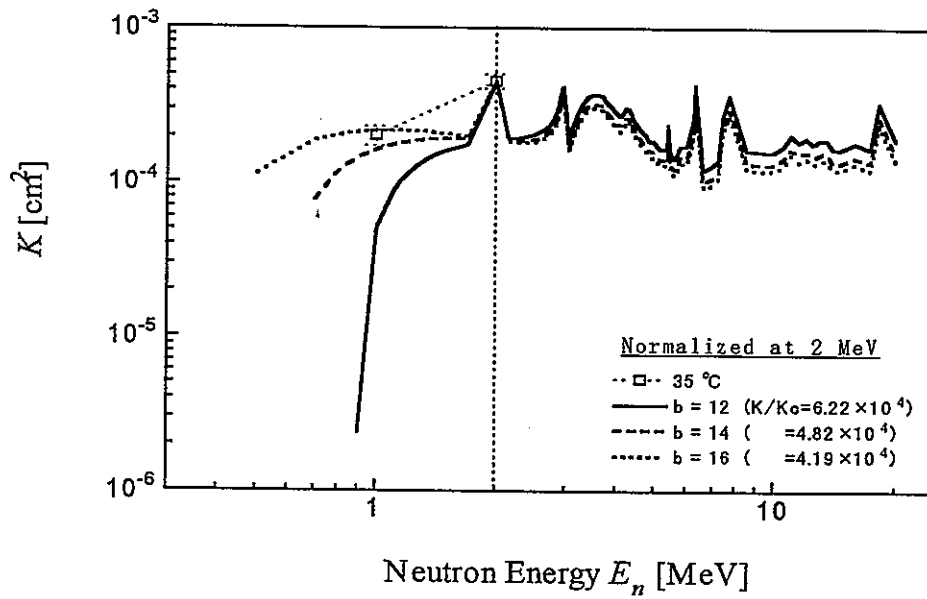


Fig.4.2.5 35 °Cでの測定値。実験値は絶対値。計算値は2MeVでの実験値で規格化している。

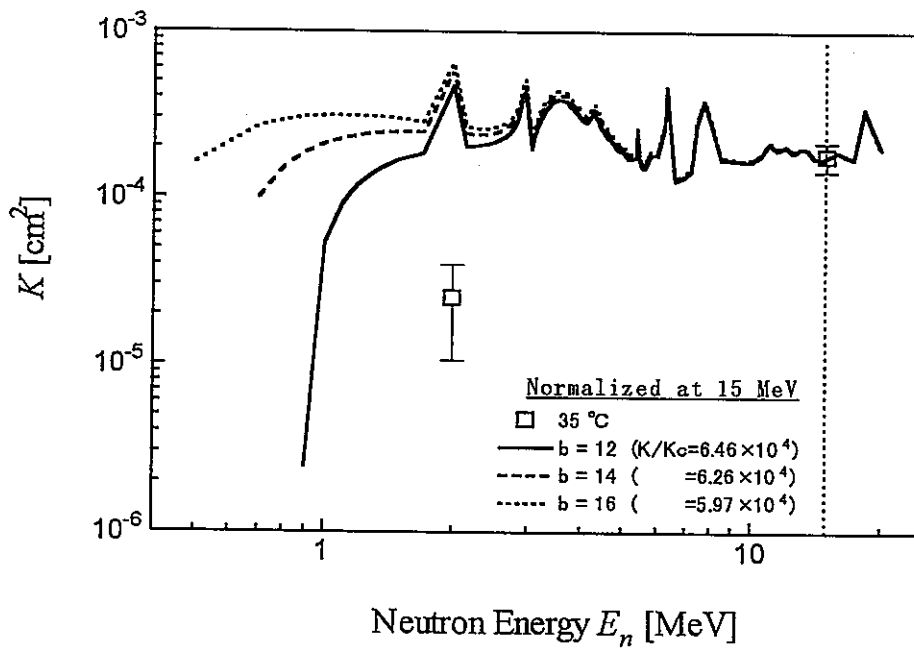


Fig.4.2.7 35 °Cでの測定値。実験値は絶対値。計算値は15MeVでの実験値で規格化している。

4.3 過熱液滴型検出器の応用と問題点

4.3.1 圧力変化によるエネルギースペクトラム評価

4.1.1に述べた実験において1-butene-SDDのAm-Be中性子検出感度の圧力依存性を得た。計算では、検出可能な中性子のしきいエネルギー値は圧力と共に低くなる。この特性を利用して簡単なエネルギースペクトラム評価の可能性について検討してみた。

照射温度25°Cにおける感度は、パラメータ**b**が10~14程度の時の計算と良く一致した。本節では**b**=14での計算感度を用いて解析を試みた。

● エネルギースペクトルのアンフォールディング^{4.4)}

はじめにしきい値の異なる複数個のSDDを用いたアンフォールディングについて述べる。

中性子に対する感度のしきい値が E_i であるSDD(SDD_{*i*})中に生成する気泡数 R_i は、以下に示す上三角行列と照射中性子スペクトル $[N_1, N_2, \dots]$ の項で表される。

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{n-1} \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \sigma_{1,1} \rangle & \langle \sigma_{1,2} \rangle & \cdots & \langle \sigma_{1,n} \rangle \\ & \langle \sigma_{2,1} \rangle & \cdots & \vdots \\ & & \cdots & \vdots \\ & 0 & \langle \sigma_{n-1,n-1} \rangle & \langle \sigma_{n-1,n} \rangle \\ & & & \langle \sigma_{n,n} \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_{n-1} \\ N_n \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

$$R_i = \sum_{j=i}^n \langle \sigma_{i,j} \rangle N_j \quad (4-2)$$

ここで N_j は、 $E_j \leq E \leq E_{j+1}$ の範囲のエネルギーを持つ中性子数で、 $\langle \sigma_{ij} \rangle$ はSDD_{*i*}の $E_j \leq E \leq E_{j+1}$ の中性子に対する平均感度である。

上三角行列近似は、しきいエネルギー以下の中性子に対する応答は0としていることに相当する。次に本実験の例を示す。

Fig.4.3.1に**b**=14、温度25°Cの計算検出感度 K_c を示す。感度は半径20 μ mの液滴一つ当たりの値である。360、460、560、660Torrの圧力下における検出しきいエネルギー値、 E_1, E_2, E_3, E_4 をTable 4.3.1に示す。(単位[MeV]) これらに基づきエネルギーを3および4群に分けることにする。Table 4.3.1には4群に分けたときの各群のエネルギー幅を ΔE として示した。

Table 4.3.1 Threshold energy

E [MeV], P [Torr]		b=14	ΔE
E_1	at 360	1.4	0.3
E_2	at 460	1.7	0.45
E_3	at 560	2.15	0.35
E_4	at 660	2.5	8.0

次にエネルギー範囲を3群に分けた場合と、4群に分けた場合について感度行列を示す。

● 3群

3群の場合、(4-1)式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} R_{360} \\ R_{460} \\ R_{560} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \sigma_{1,1} \rangle & \langle \sigma_{1,2} \rangle & \langle \sigma_{1,3} \rangle \\ 0 & \langle \sigma_{2,2} \rangle & \langle \sigma_{2,3} \rangle \\ 0 & 0 & \langle \sigma_{3,3} \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{360} \\ N_{460} \\ N_{560} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_1 \leq E \leq E_2 \\ E_2 \leq E \leq E_3 \\ E_3 \leq E \end{matrix} \quad (4-1)$$

$\langle \sigma_{ij} \rangle$ の値は、Table 4.3.1 で示したエネルギー範囲での感度の平均値である。

$\langle \sigma_{ij} \rangle$ の値をTable 4.3.2に示した。

Table 4.3.2 Components of matrix $\langle \sigma_{ij} \rangle$

	Sensitivity
$\langle \sigma_{1,1} \rangle$	6.06×10^{-10}
$\langle \sigma_{1,2} \rangle$	2.41×10^{-9}
$\langle \sigma_{1,3} \rangle$	2.15×10^{-9}
$\langle \sigma_{2,2} \rangle$	1.21×10^{-9}
$\langle \sigma_{2,3} \rangle$	1.50×10^{-9}
$\langle \sigma_{3,3} \rangle$	6.40×10^{-10}

推定される中性子スペクトルは、(4-2)で表せる。

$$\therefore \begin{pmatrix} N_{360} \\ N_{460} \\ N_{560} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\langle \sigma_{1,2} \rangle}{\langle \sigma_{1,1} \rangle} & -\frac{\langle \sigma_{1,3} \rangle \langle \sigma_{2,2} \rangle - \langle \sigma_{1,2} \rangle \langle \sigma_{2,3} \rangle}{\langle \sigma_{1,1} \rangle \langle \sigma_{2,2} \rangle \langle \sigma_{3,3} \rangle} \\ 0 & \frac{1}{\langle \sigma_{2,2} \rangle} & -\frac{\langle \sigma_{2,3} \rangle}{\langle \sigma_{2,2} \rangle \langle \sigma_{3,3} \rangle} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\langle \sigma_{3,3} \rangle} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{360} \\ R_{460} \\ R_{560} \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

● 4群

4群は、(4-3)式で表せる。

$$\begin{pmatrix} R_{360} \\ R_{460} \\ R_{560} \\ R_{660} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \sigma_{1,1} \rangle & \langle \sigma_{1,2} \rangle & \langle \sigma_{1,3} \rangle & \langle \sigma_{1,4} \rangle \\ 0 & \langle \sigma_{2,2} \rangle & \langle \sigma_{2,3} \rangle & \langle \sigma_{2,4} \rangle \\ 0 & 0 & \langle \sigma_{3,3} \rangle & \langle \sigma_{3,4} \rangle \\ 0 & 0 & 0 & \langle \sigma_{4,4} \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{360} \\ N_{460} \\ N_{560} \\ N_{660} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} E_1 \leq E \leq E_2 \\ E_2 \leq E \leq E_3 \\ E_3 \leq E \leq E_4 \\ E_4 \leq E \end{matrix} \quad (4-3)$$

中性子スペクトルは、(4-4)式で表される逆行列を用いて推定する。

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -\langle\sigma_{1,2}\rangle & \langle\sigma_{1,2}\rangle & -\langle\sigma_{1,3}\rangle & \langle\sigma_{1,3}\rangle & \langle\sigma_{1,2}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{1,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{1,2}\rangle} \right) \right\rangle & \langle\sigma_{1,2}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{1,2}\rangle} \right) \right\rangle \\ \langle\sigma_{1,1}\rangle & \langle\sigma_{1,1}\rangle & \langle\sigma_{1,1}\rangle & \langle\sigma_{1,1}\rangle & \langle\sigma_{1,1}\rangle & \langle\sigma_{1,1}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{1,2}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{1,2}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{1,2}\rangle} \right) \right\rangle \\ 0 & 1 & -\langle\sigma_{2,3}\rangle & \langle\sigma_{2,3}\rangle & \langle\sigma_{2,3}\rangle & \langle\sigma_{2,3}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{2,3}}{\sigma_{2,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{2,2}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{2,3}}{\sigma_{2,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{2,2}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{2,3}}{\sigma_{2,2}} \left(\frac{-\langle\sigma_{2,4}\rangle + \langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{2,2}\rangle} \right) \right\rangle \\ 0 & 0 & 1 & -\langle\sigma_{3,4}\rangle & \langle\sigma_{3,4}\rangle & \langle\sigma_{3,4}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{3,4}}{\sigma_{3,3}} \left(\frac{-\langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{3,3}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{3,4}}{\sigma_{3,3}} \left(\frac{-\langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{3,3}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{3,4}}{\sigma_{3,3}} \left(\frac{-\langle\sigma_{3,4}\rangle}{\langle\sigma_{3,3}\rangle} \right) \right\rangle \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\langle\sigma_{4,4}\rangle & \langle\sigma_{4,4}\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{4,4}}{\sigma_{4,4}} \left(\frac{-\langle\sigma_{4,4}\rangle}{\langle\sigma_{4,4}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{4,4}}{\sigma_{4,4}} \left(\frac{-\langle\sigma_{4,4}\rangle}{\langle\sigma_{4,4}\rangle} \right) \right\rangle & \left\langle\frac{\sigma_{4,4}}{\sigma_{4,4}} \left(\frac{-\langle\sigma_{4,4}\rangle}{\langle\sigma_{4,4}\rangle} \right) \right\rangle \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

4群での $\langle\sigma_{ij}\rangle$ の値をTable 4.3.3に示す。

Table 4.3.3 Components of matrix $\langle\sigma_{ij}\rangle$

	Sensitivity		Sensitivity
$\langle\sigma_{1,1}\rangle$	6.06×10^{-10}	$\langle\sigma_{2,3}\rangle$	1.50×10^{-9}
$\langle\sigma_{1,2}\rangle$	2.41×10^{-9}	$\langle\sigma_{2,4}\rangle$	2.99×10^{-9}
$\langle\sigma_{1,3}\rangle$	2.15×10^{-9}	$\langle\sigma_{3,3}\rangle$	6.40×10^{-10}
$\langle\sigma_{1,4}\rangle$	3.30×10^{-9}	$\langle\sigma_{3,4}\rangle$	2.59×10^{-9}
$\langle\sigma_{2,2}\rangle$	1.21×10^{-9}	$\langle\sigma_{4,4}\rangle$	2.11×10^{-9}

● 結果

この手法をAm-Be中性子照射時のSDDの応答に適用してみる。

Rには、温度25°C、圧力360~660Torrで中性子束 $2.65 \times 10^2 \text{ n/cm}^2$ 照射時に得た感度を用いる。Table 4.3.4に平均計数率とフルエンス感度を示す。

Table 4.3.4 Count rate in 25°C at 360-660 Torr

	N_{360} (360 Torr)	N_{460} (460 Torr)	N_{560} (560 Torr)	N_{660} (660 Torr)
Count rate [# / sec]	0.21814	0.16181	0.15417	0.11957
K [cm^2]	8.23×10^{-4}	6.11×10^{-4}	5.82×10^{-4}	4.51×10^{-4}

Fig.4.3.2に、Am-Be線源のスペクトルとTable 4.3.1による群分けスペクトルを示す。ここで用いる検出器のしきいエネルギー値による群分けは、Am-Be中性子の場合には第4群(或いは3群)のエネルギー幅が広く、良好なアンフォールディングが期待できないことが予想される。それで、アンフォールディングと共に、Am-Be線源のスペクトルと感度行列の積により各SDDの気泡数(推定)と実験気泡数とを比較してみた。

推定したスペクトルの結果を3群についてはTable 4.3.5に、4群についてはTable 4.3.6に示す。液滴数を40000、および70000として計算した。

Table 4.3.5 Results for 3 energy group

Bubble [#]	N_{360}	N_{460}	N_{560}	R_{360} [# / sec]	R_{460} [# / sec]	R_{560} [# / sec]
40000	1.611×10^8	-1.649×10^8	2.409×10^8	2.027×10^{-2}	1.391×10^{-2}	5.765×10^{-3}
70000	1.611×10^8	-1.649×10^8	2.409×10^8	3.547×10^{-2}	2.434×10^{-2}	1.009×10^{-2}

Table 4.3.6 Results for 4 energy group

Bubble [#]	N_{360}	N_{460}	N_{560}	N_{660}	R_{360} [#/sec]	R_{460} [#/sec]	R_{560} [#/sec]	R_{660} [#/sec]
40000	9.243×10^7	-3.092×10^8	1.156×10^7	5.667×10^7	3.171×10^{-2}	2.792×10^{-2}	2.326×10^{-2}	1.849×10^{-2}
70000	9.243×10^7	-3.092×10^8	1.156×10^7	5.667×10^7	5.550×10^{-2}	4.886×10^{-2}	4.071×10^{-2}	3.237×10^{-2}

3群・4群ともに、 N_{460} の推定値がマイナスになった。推定生成気泡数と実験で得た気泡数の比較を、Fig.4.3.3に示す。○が実験値である。

● 考察

液滴数40000個のとき推定感度は、実験の感度よりも約一桁小さい感度となった。40000は単色エネルギー実験からの推定値である。

3群の場合、560Torrでの感度が低いが、4群の計算は圧力に対する感度変化の傾向は実験感度とほぼ同様の変化を示している。絶対値が合わないのは検出液体量の見積もりが不適切のためと考えられる。

この手法はエネルギー範囲が検出しきい値近傍のスペクトル、例えば平均エネルギーが $\sim 2\text{MeV}$ を持つ ^{252}Cf 線源などには適用性がよいと思われる。

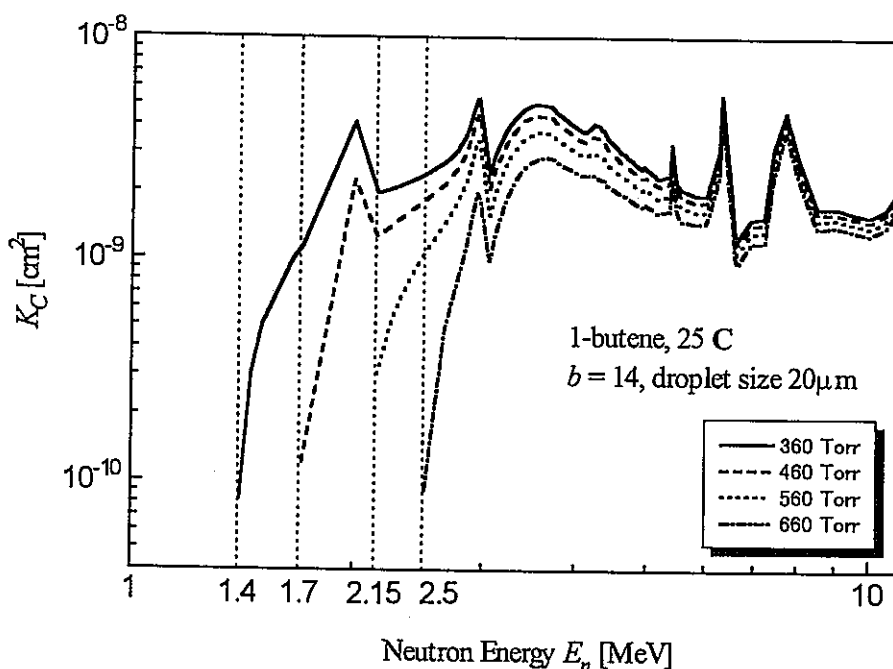


Fig.4.3.1 K_C vs. neutron energy.

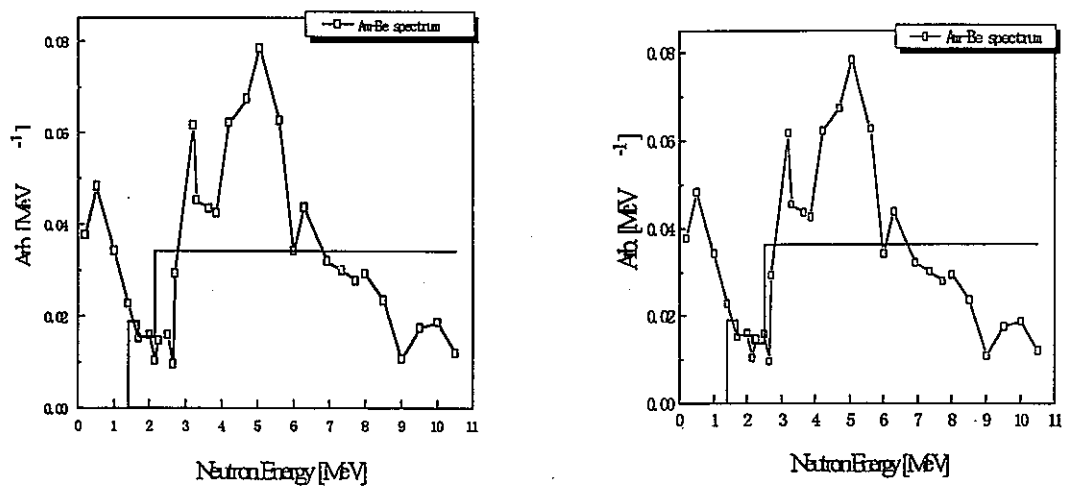


Fig.4.3.2 Spectrum in 3 and 4 energy group, which used for the estimation of bubble number.

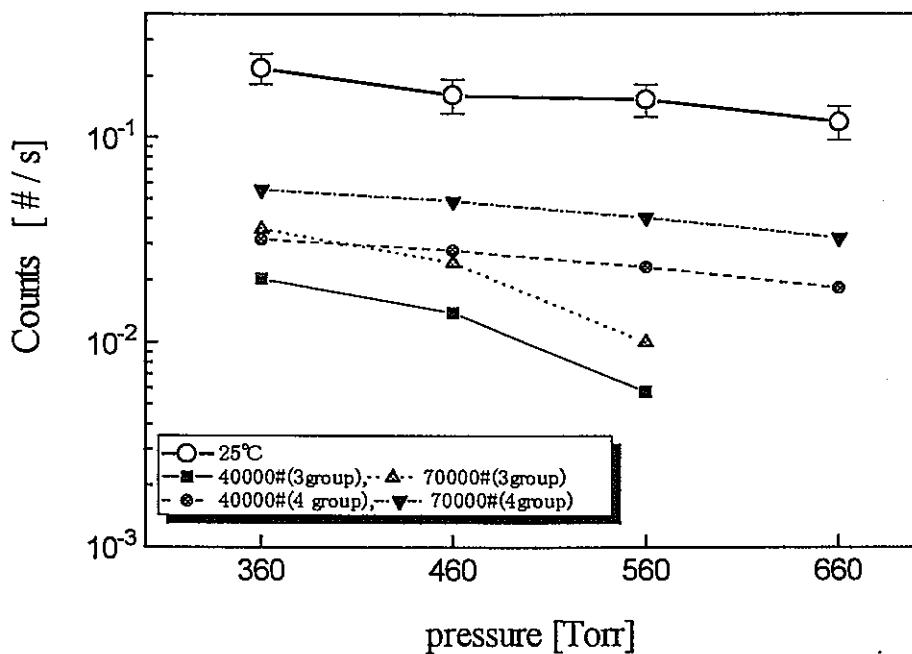


Fig.4.3.3 Am-Be照射時の減圧SDDの気泡数と推定気泡数

4.3.2 検出感度の温度依存性について

温度をパラメータとする検出感度のエネルギー依存性を用いて、4.3.1と同様にエネルギースペクトラムの評価を行うことができる。その試みは、F. d'Erricoらによって行われている。(Rad. Protect. Dos.,61,159-162,1995)^{4.5)}

しかし一般の使用には検出感度が温度で変化するのは好ましくない。温度補償付き検出器或いは検出器を一定温度に保つことが考えられている。ここではこれまでに報告されている例を挙げておく。

(1) 温度上昇による物質の体積膨張を利用する方法^{4.6)}

BTI社の温度補償付きバブルディテクタBD-100-PNDではこの方法が使って15°C～40°Cの範囲の温度補償を行っている。特殊物質を検出器上部に接する小チェンバー中に充填する。チェンバーと検出器間は薄いゴム製の膜で仕切られている。温度上昇と共に物質は膨張し、膜を介して検出器を加圧し、検出液体の温度上昇に伴う過熱度の増加(臨界エネルギーの減少)を補償する。

(2) 検出器に恒温装置(加熱)を取り付ける方法^{4.7)}

検出器をフォイル型ヒーターで被い、リボン型測温抵抗体を取り付ける。これらを更に断熱材で被う。これを比例制御により温度制御する。この手法は温度変化による感度変化を妨げるばかりではなく、低温環境での検出器使用も可能にする。

(3) 検出器に恒温装置(冷却)を取り付ける方法

SDDの使用温度の上限は過熱液滴の自発発泡により制限される。検出液体がフロン-12の場合(APD、Apfel Enterprize社)は46°Cで自発発泡したと報告されている^{4.8)}。N.C.Tam等は照射済燃料からの中性子測定にBD-100Rを使用する際、ペルチエ素子による温度制御を行っている。使用環境温度は35-45 °Cであった。^{4.9)}

【参考文献】

- 4.1) B.White et al: Health Phys.,60,703-708(1991)
- 4.2) M.Baba, M.Tanaka et al :Nucl.Instr and Meth. In Phys. Res. A 376 (1996) 115-123
- 4.3) M.J.Harper :Nucl.Sci.& Eng., 114, 118-123,(1993)
- 4.4) T.Cousins, K.Tremblay, H.Ing: IEEE. Trans. Nucl. Sci,37,1769(1990b)
- 4.5) F.d'Errico.,et al: Rad. Protect. Dos.,61,159-162,(1995)
- 4.6) H.Ing.,et al: Rad.Prot. Dos.,27,1-11,(1997)
- 4.7) F.d'Errico.,et al: Rad.Prot. Dos.,54,357-360,(1994)
- 4.8) N.E.Ipe,et al: Rad.Prot. Dos.,34,157-160,(1990)
- 4.9) N.C.Tam,et al: Rad.Prot. Dos.,65 ,417-420,(1996)

第5章 γ 線検出感度計算

この章では過熱液滴型検出器の γ 線に対する感度を計算する。

これまで γ 線に対する気泡生成条件については明らかに示しているものがみられないので、 γ 線を含めた低LET放射線に対する気泡生成条件について検討してきた。その結果、オクタフルオロプロパン(C_8F_{18} , 沸点 -36.7°C)中で、電子による気泡生成の可能性が示された。^{5.1)}そこで検出液体にオクタフルオロプロパン、支持媒質にグリセリンを用いた検出器の γ 線に対する応答をモンテカルロコードITS3.0^{5.2)}によって計算する。また計算結果をこれまでに報告されている実験値と比較、検討する。

5.1 γ 線に対する応答機構

γ 線用検出器では γ 線によって誘起される電子が気泡を生成すると考える。即ち

- (1) γ 線が支持媒質及び検出液滴構成原子と相互作用を起こし、電子を生成する。
- (2) その電子が媒質中で減速し、阻止能が上昇する。
- (3) 気泡生成条件を満たす電子が液滴内に入射し十分なエネルギーを付与し、気泡を生成する。

というモデルを考える。

気泡生成可能な電子エネルギー範囲を決定する。検出液体と動作温度・圧力が決まれば、臨界半径と臨界エネルギーが決まる。 C_8F_{18} , Freon-12及びいくつかの低沸点液体に対する臨界エネルギーをFig.5-1-1に示す。それらの液体の物性値をTable.5-1に示す。Table内の T_{sl} は過熱限界温度である。R.C.Reid^{5.3)}によると、

$$T_{sl} = T_c(0.11P_r + 0.89) = T_c \left(0.11 \frac{P}{P_c} + 0.89 \right)$$

T_c : 臨界温度 P_c : 臨界圧力

で求められる。

一方、入射放射線が気泡を生成するかどうかは放射線によって放出される荷電粒子の阻止能に依存している。 γ 線の場合は電子阻止能である。電子阻止能はITS3.0の断面積データから得た。 C_8F_{18} , Freon-12中での電子阻止能をFig.5-1-2に示す。

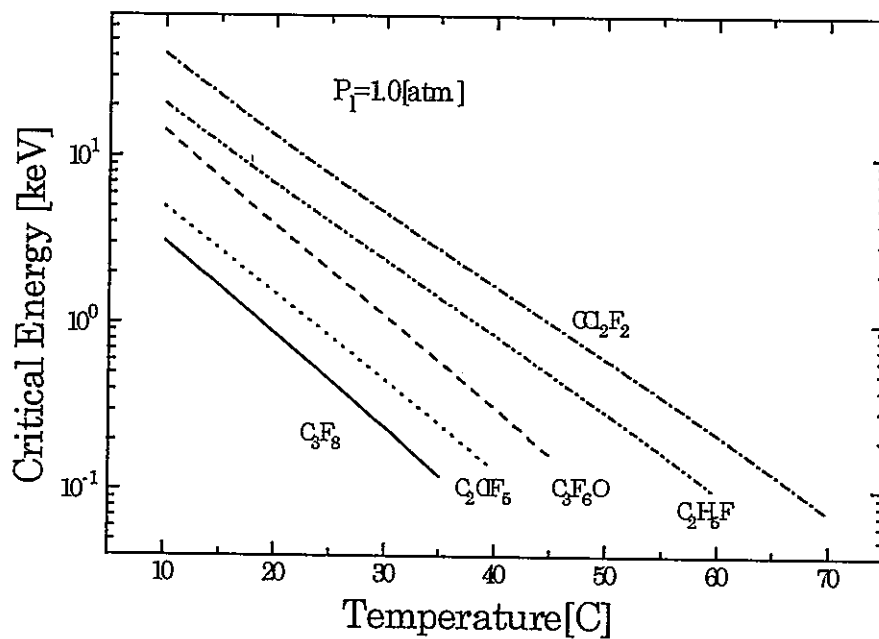


Fig.5-1-1 臨界エネルギー

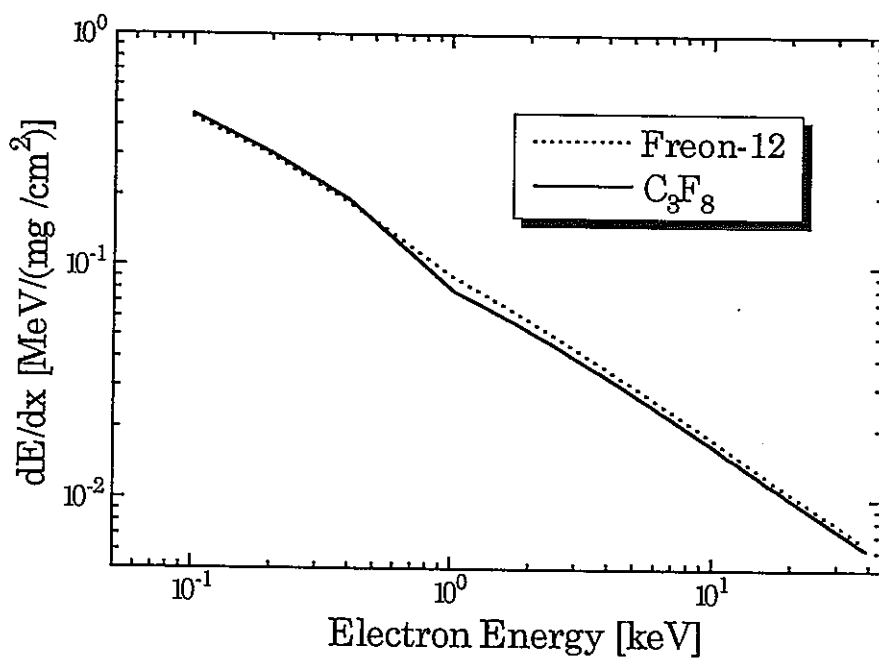


Fig.5-1-2 電子阻止能

Table.5.1 C₃F₈, Freon-12, 低沸点液体の物性値 (at 1atm. and 20°C)

Sensitive liquid	Boiling point [K]	Liquid density [g/cm ³]	Vapor pressure [bar]	Surface tension [10 ⁻³ N/m]	Critical energy [keV]	Superheated limitation T _{sl} [K]
C ₃ F ₈	236.5	1.37	7.66	4.31	0.87	308.57
trans-2-butene	274.05	0.605	1.84	13.8	2352	382.68
1-butene	266.85	0.592	2.57	12.4	365	374.60
isobutene	266.25	0.593	2.62	12.2	324	373.10
cis-2-butene	276.85	0.624	1.82	14.4	2777	388.82
CCl ₂ F ₂	243.35	1.326	5.72	9.11	13.3	343.82
C ₂ ClF ₅	235.2	1.36	7.98	5.47	1.52	315.57
C ₃ F ₆ O	245.7	1.155	5.84	5.81	3.90	319.22
C ₂ H ₅ F	235.5	0.66	8.16	9.61	6.90	334.85

Fig.5-1-2の電子阻止能に気泡生成条件を重ねてみる。気泡生成条件は
 (1)電子エネルギーが臨界エネルギー以上であること
 (2)そのエネルギーが気泡生成に有効な空間領域に付与されること
 である。2つ目の条件を言い換えると、電子が臨界阻止能以上の阻止能をもつことである。これらの条件によって検出器内の電子が気泡生成に寄与するかどうかを判定することができる。

以下の解析は動作圧力を1atm.として行なう。

動作温度T=25[°C]、気泡生成有効空間領域を決定するパラメータb=25として検討した。その結果をFig.5-1-3に示す。図よりC₃F₈の場合、2つの条件に囲まれた部分(斜線部)のエネルギー範囲の電子が気泡生成に寄与する。点A(E_c, E_c/bR_d)と電子阻止能曲線が気泡生成可能な電子エネルギー範囲を決定するために必要である。(E_c, E_c/bR_d)は温度によって決まる。一方、Freon-12に対する点A'(E_c, E_c/bR_d)は電子阻止能の上に存在する。従って25°Cでは電子は気泡生成に寄与しないことがわかる。

各温度で検討するために、連続点(E_c, E_c/bR_d)をbをパラメータとして電子阻止能とともにFig.5-1-4に示す。図中の○、●は左から40°C、35、30……、10°Cのように5°Cおきの(E_c, E_c/bR_d)を示している。Fig.5-1-4はFreon-12の場合、b=5~25、40°C以下では気泡を生成しないことを示している。一方、C₃F₈の場合はb=5では30°C以上、b=25では20°C以上で気泡を生成する。

電子阻止能はエネルギーの減少と共に単調に増大する。そのために、気泡生成可能な電子エネルギーの下限値は臨界エネルギーによって、上限値は阻止能によって決定される。

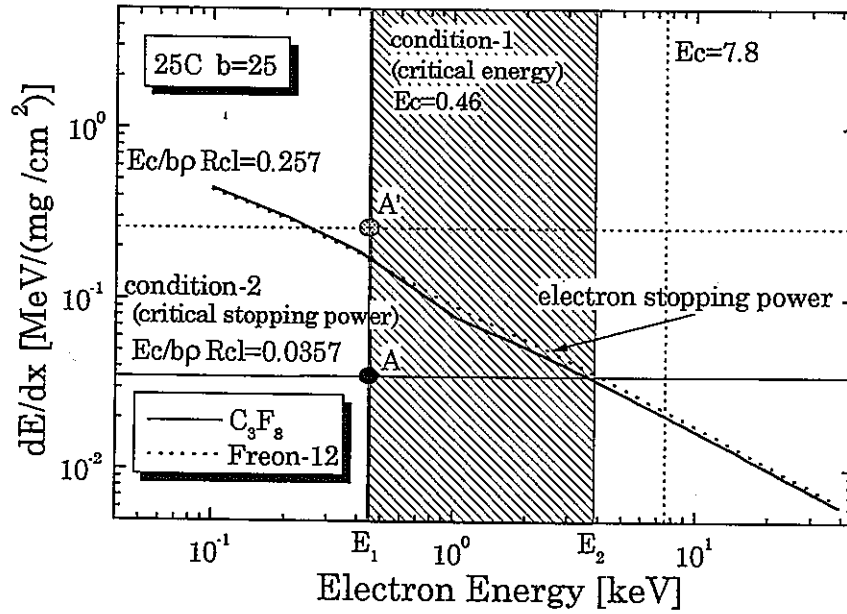


Fig.5-1-3 気泡生成可能な電子エネルギー範囲

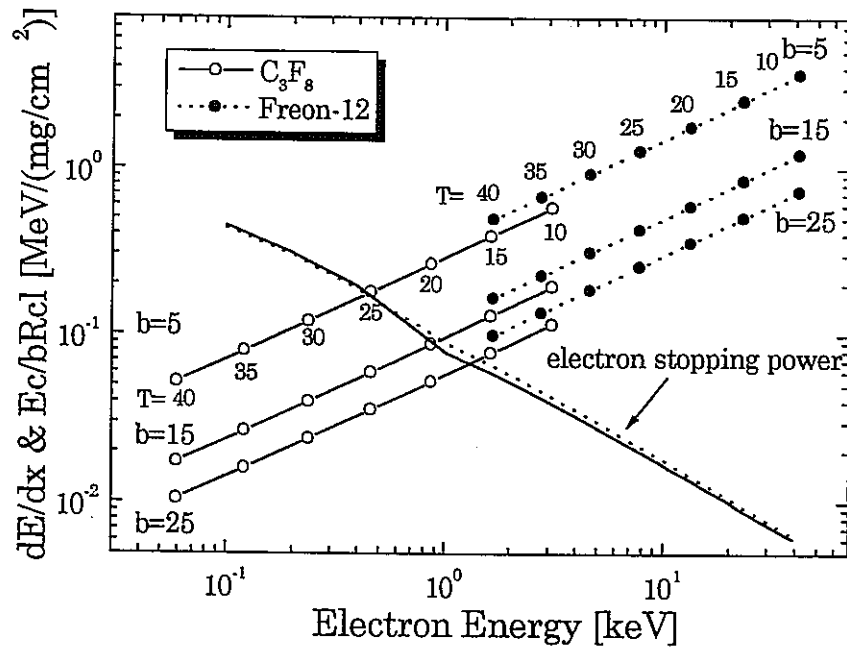


Fig.5-1-4 異なる温度、b値における気泡生成可能な電子エネルギー範囲

5.2 検出感度計算

5.2.1 感度の定義、幾何形状

検出液体に C_3F_8 、支持媒質にグリセリンを用いた検出器の γ 線に対する感度を計算する。検出感度は気泡生成条件を満たす電子の液滴への入射数を考えることで得られる。

液滴体積は支持媒質体積に比べて十分に小さいこと、両者の比重差が小さいことに基づいて、検出器を構成するのは支持媒質のみであるとした。従って電子線束スペクトルは支持媒質によって決定され、検出液体の存在による効果は無視してよい。

入射 γ 線(エネルギー E_g)による検出器中の電子線束 $\varphi(\vec{r}, E; E_g)$ (\vec{r} : 検出器内の位置、 E : 電子エネルギー)はモンテカルロコードITS3.0で計算した。単位フルエンスあたりの気泡数 K [bubbles/cm²]及び単位線量当量当たりの気泡数 K_H [bubbles/Sv]は以下のように得られる。

$$K(E_g) = \frac{N_B}{\Phi} = VN\pi R_l^2 \cdot k \quad k = \frac{1}{V} \int_V \int_{E_1}^{E_2} \frac{\varphi(\vec{r}, E; E_g)}{\Phi} d\vec{r} dE$$

$$K_H(E_g) = \frac{N_B}{H} = \frac{N_B/\Phi}{H/\Phi} = VN\pi R_l^2 \cdot k_H \quad k_H = \frac{1}{V \cdot f(E_g)} \int_V \int_{E_1}^{E_2} \frac{\varphi(\vec{r}, E; E_g)}{\Phi} d\vec{r} dE$$

N_B : 検出器内の気泡数 Φ : 入射 γ 線フルエンス V : 検出器体積 R_l : 液滴半径
 N : 液滴数密度 H : 線量当量 $f(E_g)^{5,4}$: フルエンス線量当量換算係数

k , k_H は液滴の単位断面積あたりの感度である。 $f(E_g)$ では単位フルエンス当たりの1cm線量当量(ICRP球)で、面平行ビームに対するものである。

ITS3.0の計算幾何形状をFig.5-2-1に示す。ITSコードの中でもっとも応用性があり、様々な幾何形状を表現できるという点からACCEPTコードで計算する。

半径0.8cm、高さ7.0cmの円柱を検出器とし、グリセリンで構成されている。 γ 線源の位置は検出器から10cm離れた所である。線源から放出される γ 線の方向は検出器の軸に対して垂直である。検出器-線源間は空気である。

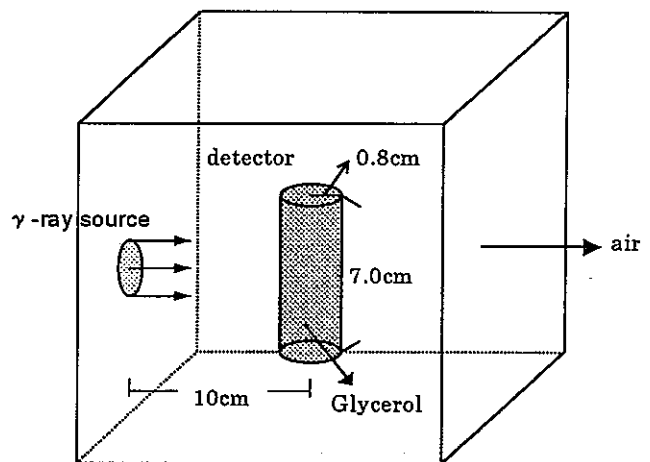


Fig.5-2-1 ITS3.0への入力条件

5.2.2 計算結果

30～660keVの γ 線に対して感度を計算した。検出器内の液滴数及び液滴半径は与えられていない。そこで有効電子線束 k 、 k_H を考える。この値は単位液滴の単位断面積当たりの感度である。ITS3.0のelectron cutoff energyを2.7keVに設定した。この値は660keV γ 線に対するITS-ACCEPTコードの計算下限値である。気泡生成可能な電子エネルギーの下限値 E_1 は2.7keV以下なのでcutoff energyによって下限値が設定されることになる。入射 γ 線エネルギーと k 、 k_H との関係を動作温度 T をパラメータとしてFig.5-2-1,5-2-2に示す。これ以後、エネルギー有効付与領域を決定するパラメータ b を25として計算する。Fig.5-2-1よりフルエンス感度は γ 線エネルギーに対して単調増加する。一方、線量感度は各温度で60～660keVの γ 線に対し、ほぼ平坦であることがFig5-2-2からわかる。30,50keVでは感度が低下している。これは空気による γ 線の減衰によるものと考えられる。

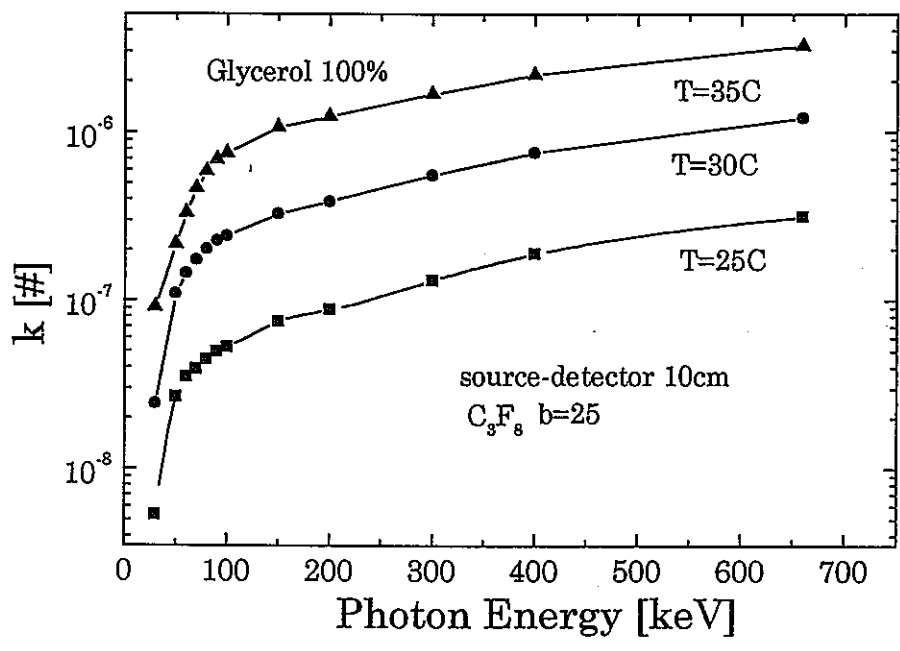


Fig.5-2-2 入射 γ 線エネルギーと k との関係

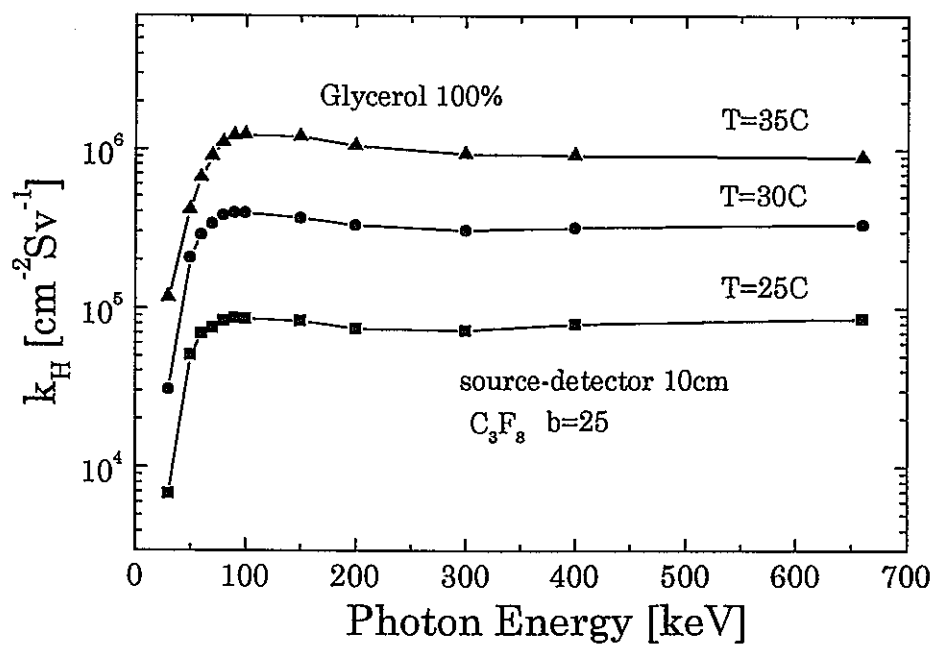


Fig5-2-3 入射 γ 線エネルギーと k_H との関係

次に ^{137}Cs (660keV)を γ 線源として、 k_H の温度依存性を考える。Fig.5-2-4に計算結果と市販の γ 線用検出器(BD GAMMA)を用いたIngら^{5.5) 5.6) 5.7)}の実験結果を示す。横軸は動作温度T、縦軸は25°Cの値で規格化した線量感度である。

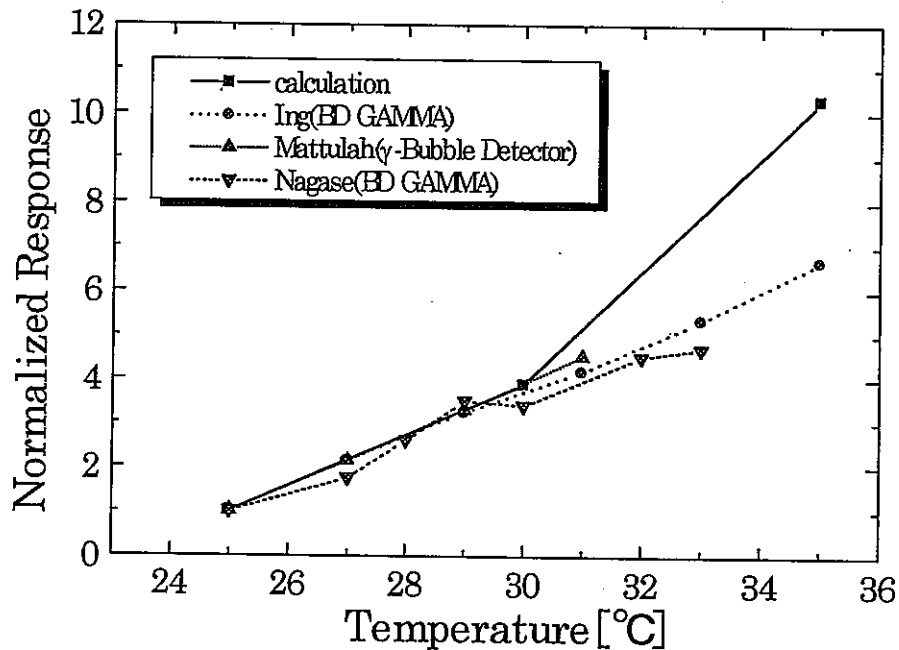


Fig.5-2-4 動作温度と k_H の関係

感度に温度依存性があるのは臨界エネルギーが動作温度の関数だからである。温度の上昇と共に臨界エネルギーは減少するので、感度は上昇する。実験結果では感度が温度と共にほぼ線形に増加している。一方、計算では30°C以上で感度の上昇率が大きくなっている。

BD-GAMMAには検出液体と支持媒質の比重差を調整するために支持媒質に重い元素を含む*normal production*と含まない*special production*があり、Pollockによる実験^{5.8)}が行なわれている。小泉による組成分析結果^{5.9)}からCsClが市販検出器で重い元素として用いられていると考えられる。そこで検出液体(C_3F_8)と支持媒質の比重が等しくなるように、CsClを4%添加した支持媒質で感度を計算した。計算値とPollockの実験値を660keVの値で規格化したものをFig.5-2-5に示す。

CsClなしの場合、計算・実験値とも γ 線エネルギーに対してほぼ平坦な感度を示している。CsClありの場合、感度ピークが現れている。このピークはCsClの光電効果によるものである。光電効果断面積の上昇によって検出器内の電子数が増加し、入射 γ 線の全エネルギーが付与される確率が増加する。そのことが感度上昇につながると考えられる。しかし計算値はそのピークを示すエネルギーが実験値に比べて低エネルギー側にずれ、平坦部とピークの差も小さい。

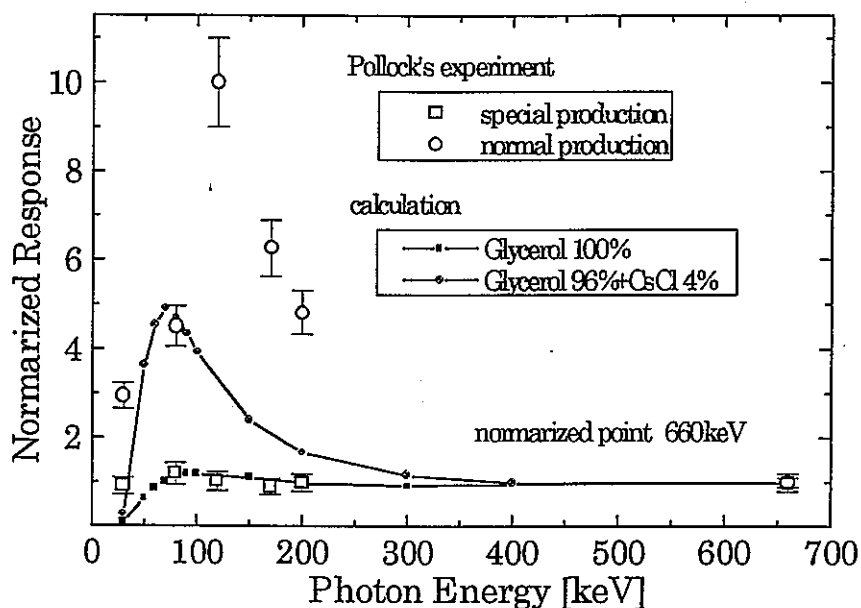


Fig.5-2-5 計算値とPollockの実験値の比較

線量感度のエネルギー依存性およびCsClによる感度変化を検討するために検出器内の電子線束を議論する。入射 γ 線源として ^{137}Cs (0.662MeV), ^{22}Na (0.511MeV), ^{137}Ba (0.1914MeV)を考えた。支持媒質をグリセリンとした場合の単位光子・単位線量あたりの電子線束をFig.5-2-6, 5-2-7に示す。CsClを含む場合に対してFig.5-2-8, 5-2-9に示す。

気泡生成可能な電子エネルギー範囲は25~35°Cでは~10keVである。支持媒質がグリセリンのみの場合、数keV領域の単位光子あたりの電子線束は入射 γ 線エネルギーが高いほど、大きな値を示しており、Fig.5-2-2のような k のエネルギー依存性が現れる。しかし単位線量あたりに換算すると、各 γ 線源に対して電子線束はほぼ等しくなる。 k_H が γ 線エネルギーに対して平坦になるのはこのことによる。さらにCsClを加えると低エネルギー γ 線(^{137}Ba)の電子線束が他と比べて増加している。これが*normal production*のエネルギー特性に関係している。このように支持媒質の組成によって γ 線検出感度のエネルギー依存性が変化する。変化の度合いは検出器内の電子線束を計算することで知ることが可能である。

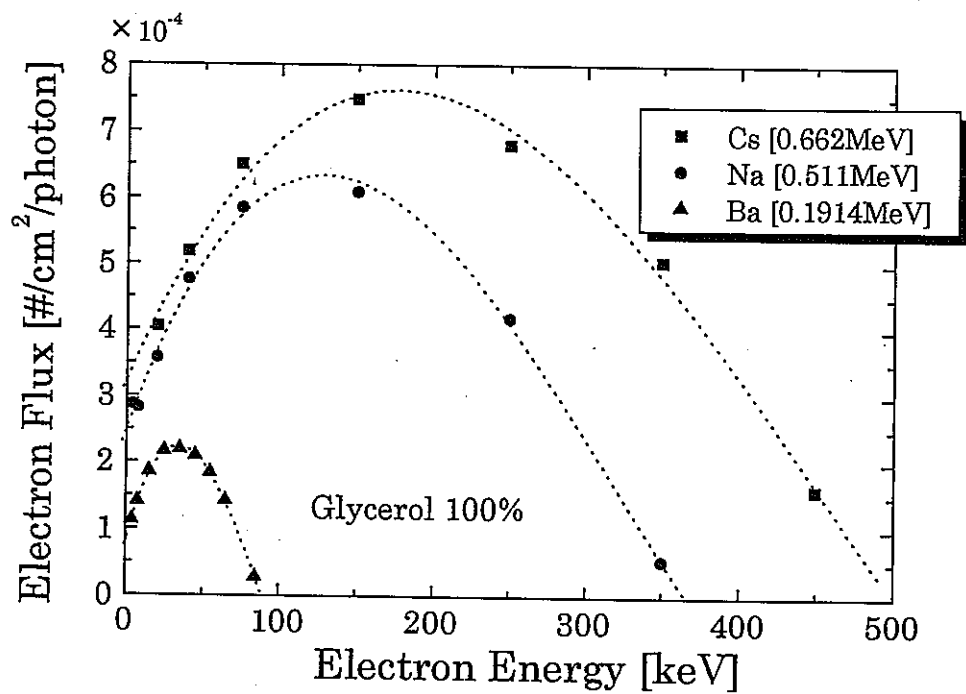


Fig.5-2-6 検出器中(グリセリン)の電子線束

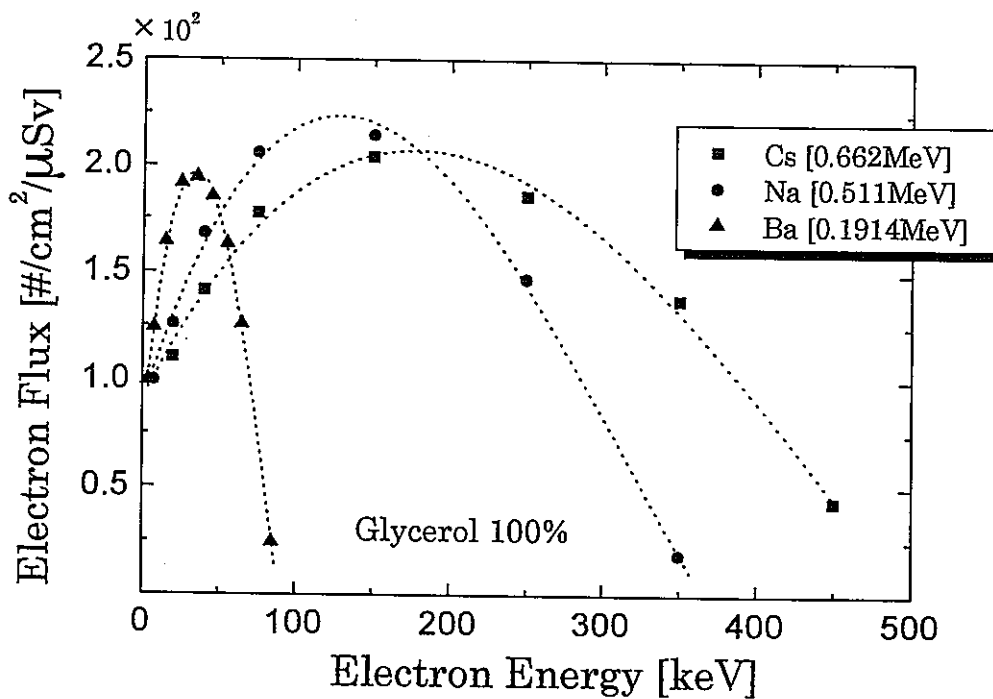


Fig.5-2-7 検出器中(グリセリン)の電子線束

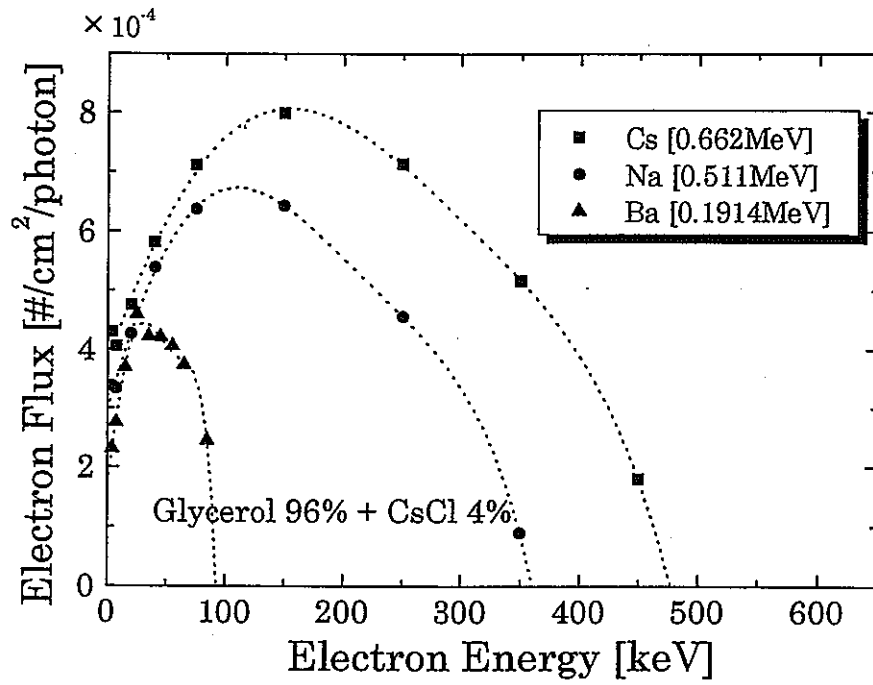


Fig.5-2-8 検出器内(グリセリン+CsCl)の電子線束

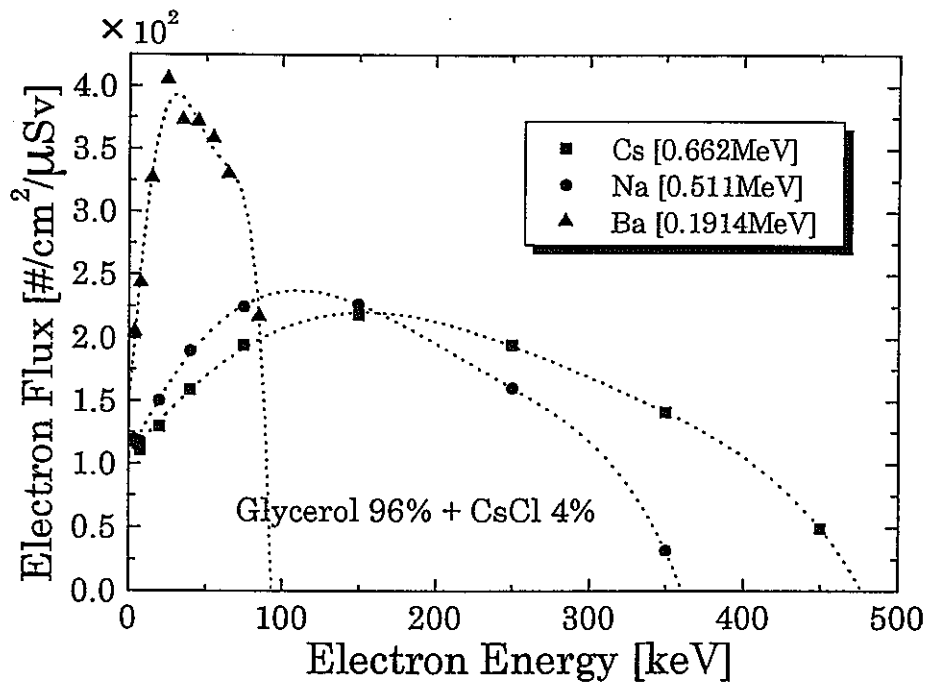


Fig.5-2-9 検出器内(グリセリン+ CsCl)の電子線束

昨年の報告では γ 線源を検出器の底面に密着させて計算した(条件A)。今回の計算結果(条件B)とともにFig.5-2-10に示す。計算値は660keVの値で規格化して比較した。

グリセリンのみの場合、条件Aでは100keV付近にわずかなピークがあるのに対して、条件Bではほぼ一定の感度になり、Pollockの実験値と同様な傾向を示している。CsClを添加した場合、照射条件によってピーク位置の変化は見られなかった。ただし条件Bの30keVの感度は2種類の支持媒質とも急激に減少している。これは空気による γ 線の減衰によるものと考えられる。この結果から照射体系が検出感度に大きな影響を与えることがわかる。現在は検出器の容器を無視して計算しているが、容器による γ 線の減衰(特に低エネルギー γ 線)を考慮しなければならないだろう。

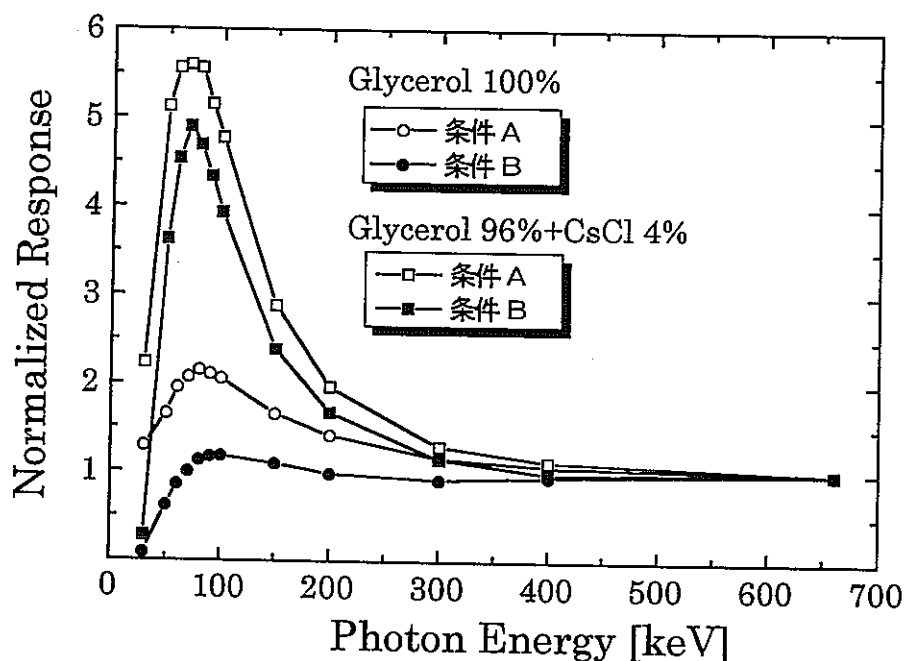


Fig.5-2-10 照射体系による感度変化

5.3 まとめ

γ 線と検出器中の支持媒質との相互作用によって発生した電子が、気泡生成条件を満たして液滴に入射すると気泡を生成するというモデルを考えた。そのモデルに従うと、 C_3F_8 による γ 線検出が $20^{\circ}C$ 以上の温度で可能であることが示された。そこでモンテカルロコードITS3.0により γ 線検出感度を計算した。感度のエネルギー依存性、温度依存性について計算値とIng, Pollockらの実験値と比較した。計算結果から支持媒質中の数%の重い元素が低エネルギー領域の γ 線に対する感度に重要な影響を与えることがわかった。また照射条件(幾何学的条件)によっても感度に変化することが確認された。

【参考文献】

- 5.1) T.Sawamura et.al; Radiation detectors and their uses (KEK Proceedings 96-4)
- 5.2) J.A.Halbleib and T.A.Mehlhorn: "ITS: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes", SAND 84-0573(or CCC-467) (November 1984) Sandia National Laboratory
- 5.3) R.C.Reid et al; The properties of gases and liquids, 4th ed., McGraw Hill(1977)
- 5.4) ICRP Publication-51 (1988)
- 5.5) H.Ing, R.A.Noulty and T.D.Mclean : Rad.Meas.,27,1,1-11 (1997)
- 5.6) Mattullah et al: Nucl. Tracks Rad. Meas,22,691-694(1993)
- 5.7) 藤崎三郎;ハブルディテクターの紹介とその応用(中性子ラジオグラフィ利用技術研究会, 平成4年12月)
- 5.8) R.W.Pollock :Nucl.Tracks Rad.Meas,15,483(1988)
- 5.9) 小泉勝三;気泡検出器の組成分析結果報告書 (No.91-PH06, 平成3年7月)
- 5.10) Mattullah et al: Rad. Meas.,28,1-6,115-118(1997)

第6章 結論

第2章以下、各章のテーマに関する今年度の成果と問題点を示し、最後に来年度への課題について述べる。

第2章ではSDDの試作法について述べた。今年度は検出液体を液滴状にしてグリセリン中に拡散させるのに、圧力容器中でホモジナイザーを用いた。ホモジナイザー使用により液滴体積が小さくなり、圧力容器中で行うことにより、攪拌によりつくられた液滴が平衡状態に達する迄に消滅する確率が低くなり、多数の液滴を含む検出器ができるようになった。しかし、未だ感度の揃った検出器、フレオンのように沸点が低い検出器の作成は難しい状態である。

第3章で示した気泡計数システムは、単色中性子照射実験に使用し気泡計数特性が良好であることを確認した。本システムの波形処理手法は他の研究者により採用されている方法と違っているようである。他研究者による方法は、その詳細は明らかでないが、同時計数回路の採用、AD変換—マイクロプロセッサを含む等のようなものである。試作検出器は、市販検出器のBD-100Rに比べるとAEセンサー波形にばらつきがあるが、本方式が有効であることが示された。今後、回路の小型化を行えばSDDは能動型(electronic型)検出器としても使用可能である。

第4章はこれまでの続きであるが、今年度は従来より良好な検出器を得て圧力や温度をパラメータとするエネルギー依存検出感度の測定を行うことができた。感度計算は、高エネルギー領域において顕著になる非弾性散乱の項を考慮した計算に修正した。また全ての実験を通じて検出感度計算に必要な有効エネルギー領域に関するパラメータ b' として $b=14$ を得た。

単色中性子実験からは、検出器の液滴数の推定を行うことができた。

圧力を変化して取得した検出器応答をエネルギー弁別検出器とする解析を行った。本研究で得られた検出器しきい値は1.4~2.5MeVであった。このあたりにエネルギーを有する中性子スペクトル推定が可能かと思われるが、実験的検証はできなかった。

通常現場への適用には、感度の温度依存性が問題になると思われ、本章では検出感度の温度補償についての調査結果を簡単に述べた。これには適当な物質の体積膨張による検出器への加圧を用いる方法と、検出器に恒温装置を取り付ける方法がある。前者は優れた方法であるが、その物質の選択が難しい。後者は検出器の使用温度範囲を拡大することができ、また今日の加熱・冷却素材や制御回路素子を用いると小型化も可能で採用しやすい方法と思われる。

以上より、今年度行わなかった問題も含めて来年度の課題を以下に示す。

- (1) 試作検出器の液滴半径・液滴数の同定、或いは感度をそろえること。再使用性、経時変化等のデータ取得。
- (2) 中性子検出感度のエネルギー依存性のより詳細な実験

- (3) Buteneで得られた結果を用いた、各種低沸点液体の基本特性の評価
- (4) 圧力変化によりSDDをエネルギー弁別検出器として利用、スペクトル評価の実験的検証(Cf線源を用いる)。その他の液体によるSDDのエネルギー弁別検出器としての利用可能性の検討。
- (5) SDDの能動検出器としての現場への適用性検討(温度制御・発生音検出計数による)

等が考えられる。