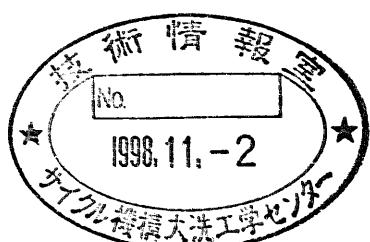


分置

# 中性子検出器応答評価モンテカルロ計算コード NRESP98の開発

— 球形BF<sub>3</sub>比例計算管の応答評価 —

1998年5月



動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 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 システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology  
Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki,  
Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation) 1998

中性子検出器応答評価モンテカルロ計算コード NRESP98 の開発  
－球形  $\text{BF}_3$  比例計数管の応答評価－

橋本 周\*、齋藤 圭\*、安藤秀樹\*\*

要旨

中性子線量当量率測定器や多減速材型中性子スペクトロメータとして広く用いられている球形  $\text{BF}_3$  比例計数管の応答特性について計算的に評価する手法を開発した。

応答評価用の計算コードとして、既存の中性子検出器応答計算コード NRESP シリーズを選んだ。従来の NRESP シリーズは適用範囲が限定されていたため、検出器形状、構成元素などを拡張し、汎用型中性子検出器応答計算コード NRESP98 として整備した。

NRESP98 の検証は、球形  $\text{BF}_3$  比例計数管の応答特性について行った。検出器内の増幅率分布の影響、荷電粒子輸送の詳細評価及び統計的分散の影響を加味することで、試験結果に対して  $\pm 10\%$  以内で、検出器の応答特性を評価することができた。

---

\* : 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

\*\* : 大洗工学センター 安全管理部

**Development of NRESP98 Monte Carlo Codes  
for the Calculation of Neutron Response Functions of Neutron Detectors  
– Calculation of the Response Function of Spherical BF<sub>3</sub> Proportional Counter –**

M.Hashimoto\*, K.Saito\* and H.Ando\*\*

**Abstract**

The method to calculate the response function of spherical BF<sub>3</sub> proportional counter, which is commonly used as neutron dose rate meter and neutron spectrometer with multi moderator system, is developed.

As the calculation code for evaluating the response function, the existing code series NRESP, the Monte Carlo code for the calculation of response function of neutron detectors, is selected. However, the application scope of the existing NRESP is restricted, the NRESP98 is tuned as generally applicable code, with expansion of the geometrical condition, the applicable element, etc.

The NRESP98 is tested with the response function of the spherical BF<sub>3</sub> proportional counter. Including the effect of the distribution of amplification factor, the detailed evaluation of the charged particle transportation and the effect of the statistical distribution, the result of NRESP98 calculation fit the experience within ± 10%.

---

\*: Radiation Control Section, Health and Safety Division, O-arai Engineering Center

\*\*: Health and Safety Division, O-arai Engineering Center

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.NRESP98 概要 .....	2
2.1 NRESP、NRESP-G と NRESP98 .....	2
2.2 検出器形状の自由度の拡張 .....	2
2.3 評価対象核種の拡張 .....	3
2.4 コード構造 .....	3
3.球形 BF <sub>3</sub> 計数管の応答評価 .....	10
3.1 検出器の構造と試験条件 .....	10
3.2 応答試験結果 .....	10
3.3 検証(1) .....	11
3.4 統計分散の補正 .....	11
3.5 電界分布の影響 .....	13
3.5.1 検出器内の電界分布 .....	13
3.5.2 検出器内の増幅率分布 .....	14
3.6 荷電粒子の輸送計算に関する検討 .....	15
3.6.1 阻止能の評価 .....	15
3.6.2 荷電粒子の挙動 .....	16
3.7 検証(2) .....	17
4.まとめと今後の課題 .....	37
4.1 まとめ .....	37
4.2 今後の課題 .....	37
5.謝辞 .....	38
参考文献 .....	39

付録 1 NRESP98 入力データの説明

付録 2 NRESP98 入力データ例

付録 3 NRESP98 計算結果概要データ例

付録 4 NRESP98 計算結果スペクトルデータ例

## 図表目次

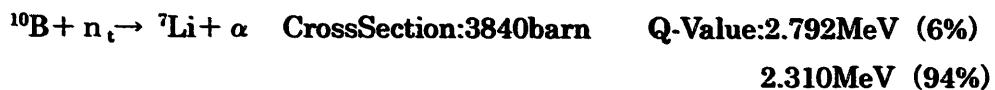
図 2-1 NRESP98 のサブルーチン単位での計算フロー	9
図 3-1 球形 $BF_3$ 比例計数管構造図	19
図 3-2 試験状況図	20
図 3-3 球形 $BF_3$ 比例計数管応答試験結果	21
図 3-4 $BF_3$ 比例計数管の出力例	22
図 3-5 球形 $BF_3$ 比例計数管応答評価計算体系図	23
図 3-6 球形 $BF_3$ 比例計数管応答評価計算結果（その 1）	24
図 3-7 球形 $BF_3$ 比例計数管応答評価計算結果（その 2）	25
図 3-8 球形比例計数管電界分布評価体系	26
図 3-9 球形比例計数管電界分布評価結果	28
図 3-10 球形比例計数管増幅率分布評価結果	30
図 3-11 球形 $BF_3$ 比例計数管応答評価計算結果（その 3）	31
図 3-12 種々の重イオンの比エネルギー損失に関するデータ	32
図 3-13 $BF_3$ ガス中の Li 粒子の阻止能の評価結果	33
図 3-14 検出器内で生成した荷電粒子の挙動	34
図 3-15 球形 $BF_3$ 比例計数管応答評価計算結果（その 4）	35
図 3-16 応答評価計算結果と応答試験結果の比較	36
 表 2-1 NRESP98 サブルーチン機能表	4
表 3-1 球形 $BF_3$ 計数管仕様	18
表 3-2 ガス増幅率評価に用いる定数値	15
表 3-3 球形比例計数管電界分布評価結果	27
表 3-4 球形比例計数管増幅率分布評価結果	29
表 3-5 応答評価計算結果と応答試験結果の比較	17

## 1. はじめに

放射線管理課では、放射線測定器の応答特性を計算で評価する手法の開発を行ってきた。これまでに、モンテカルロ電子光子輸送計算コード EGS4 を用いた  $\beta$  線及び  $\gamma$  線測定器の応答評価手法の開発を行い、シンチレーションファイバーガスモニタの開発において成果を上げている<sup>1)</sup>。本研究では、モンテカルロ計算コードにより中性子測定装置の応答評価を行うことを目的とした。

すでに、中性子測定装置の応答評価計算コードとしては、中性子測定用有機シンチレータや円筒型  $^3\text{He}$  比例計数管の応答計算コードである NRESP 及び NRESP-G がある。そこで、本研究ではこれをさらに拡張し、より多くの種類の測定器を評価できる汎用型中性子検出器応答計算用コード NRESP98 を整備することにした。

NRESP98 の整備において、評価対象として球形  $\text{BF}_3$  比例計数管を設定した。 $\text{BF}_3$  比例計数管は、 $^3\text{He}$  比例計数管と同様に熱中性子に対して高い感度を持っており、中性子測定装置として広く使われている。 $\text{BF}_3$  に含まれる  $^{10}\text{B}$  と  $^3\text{He}$  を比較した場合、熱中性子に対する反応断面積は  $^3\text{He}$  が優れているが、 $^{10}\text{B}$  は反応の Q 値が大きく反応の弁別性能に優れている。



これらの理由から、 $\text{BF}_3$  比例計数管は、作業環境における中性子線量当量率の測定、中性子スペクトルの測定等に使われており応用範囲が広い。 $^3\text{He}$  比例計数管についてはすでに NRESP-G の開発において行われており、ここでは球形  $\text{BF}_3$  比例計数管についての評価を行うものとした。

## 2. NRESP98 概要

### 2-1 NRESP、NRESP-G と NRESP98

NRESP ( Neutron Response calculation Code ) は、Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) の Dietze らが開発したもので、本来 NE213 などのシンチレーション中性子検出器の応答評価のために開発されたモンテカルロ計算コードである<sup>2)</sup>。中性子の発生、移動、散乱、吸収などを重み付けしたモンテカルロ法で模擬し、指定した領域で失われるエネルギーを反応種類ごとに求めて、検出器の応答関数、検出効率等を評価するものである。Dietze らは、これを用いて有機シンチレータの応答関数の計算を行った。検出器有感領域へのエネルギー付与を発光量に変換し、入射中性子束に対する発光量の関係として応答関数を求めている。

電子技術総合研究所の工藤らはこれを拡張し、円筒形  $^3\text{He}$  比例計数管用応答計算コード NRESP-G を開発した<sup>3),4)</sup>。NRESP-G では、円筒形  $^3\text{He}$  比例計数管での反応評価ができるように、円筒形状の計算体系を作成し、検出器構成物質や反応のデータを追加したほか、ガス比例計数管の反応評価において重要な壁効果や電界効果などの影響を加味した二次生成粒子の挙動の評価について拡張した。その結果、円筒形  $^3\text{He}$  比例計数管の応答について、十分に評価することができた。

今回の、NRESP98 の整備では、NRESP-G について更なる拡張を行い、一般に放射線管理で使われる中性子検出器の応答評価に広く対応できるようにすることを目標とした。NRESP98 における主要な改良項目は以下のとおりである。

- ① 検出器形状の自由度の拡張
- ② 評価物質の追加

それぞれの項目に着目して、NRESP98 の概要を示す。

### 2-2 検出器形状の自由度の拡張

放射線検出器の形状は、放射線検出における幾何学的効率の決定などにおいて重要な評価条件になる。NRESP シリーズは、あらかじめ想定されている限られた種類の検出器の応答計算を目的としていたため、検出器形状の選択肢はかぎられていた。例えば、NRESP では直方体形状のシンチレータに関する計算のみを想定しており、NRESP-G ではそれに加えて円柱形状を追加した。NRESP98 では、これらに加えて球形を評価体系として追加した。これにより、通常使われている中性子検出器のほぼすべてについて評価が行えるようになった。

また、従来は検出器の壁面について単一層しか定義できなかったものを、複数層で構成される検出器壁について定義できるように拡張した。これは、中性子検出においてはしばしば減速材が用いられ、それが検出器出力に大きな影響を及ぼすからである。これにより、検出器単体としての応答評価だけでなく、減速材や保護容器など含めた中性子検出装置全体を一つのシステムとした応答評価も行えるようになった。これは、中性子線量当量率計

や中性子エリアモニタ、減速材型中性子スペクトロメータ等の応答評価を行うのに有効である。

### 2-3 評価物質の追加

NRESP では NE213 等の有機シンチレータ、また NRESP-G では円筒形  $^3\text{He}$  比例計数管を評価対象検出器として限定しており、これらの評価体系を構成する物質についての核反応データが整備されていれば十分だった。しかし、評価対象検出器の種類を拡張するには、より多くの物質を評価対象に組み込まなければならない。そこで、中性子輸送計算に広く用いられている MCNP (General Monte Carlo code for Neutron and Photon Transport)<sup>5)</sup>でも使われている核データ ENDF/B-IVを参照し、そこから必要なデータをあらかじめ読み出すような形とした。なお、その際、これらの読み出したデータについては、後の計算における便宜を図るために、別にデータベースとして整備できるようにした。

評価物質が追加されたことにより、評価する反応種類も増し、二次粒子も多様化する。二次粒子の挙動は、比例計数管型検出器に電気信号を与える直接の要因となるほか、壁効果の評価においても重要なとなり、適切に評価する必要がある。まず、 $\gamma$ 線及び電子線の挙動については、MCNP-4A で使われている二次 $\gamma$ 線の輸送計算手法に習った。また、重荷電粒子については、想定される媒質と粒子の阻止能に関するデータテーブルを作成し、そこから有感領域におけるエネルギー付与を求めるようにした。データテーブルの作成に当たっては、文献<sup>6)7)</sup>や、Bethe 式等を参考にした。

また、MCNP-4A で適用されている、熱中性子と分子及び分子結晶との相互作用も評価に加えることにより、低エネルギー領域での反応の評価も十分に行えるようになった。

### 2-4 コード構造

従来の限られた種類の検出器に対する評価から適用範囲を広げるに当たっての拡張性を持たせるために、コードの全体構造に関しても整理を行った。

その結果、NRESP98 は従来のものと計算フローについては変わらないが、全体構造がサブルーチン構造に整理された。サブルーチンで構成した計算フローを図 2-1 に、また、サブルーチンの機能表を表 2-1 に示す。

表 2-1 NRESP98 サブルーチン機能表

サブルーチン名	上位ルーチン	下位ルーチン	機能概要
ADDIT	SETWAL	AMUDAT	原子質量数の設定
AMUDAT	ADDIT		ファイル名 NRESPAMU.DAT より 原子質量数等のデータを読み込み
CALDSB	MAIN		分散の計算
CNA9BE	MODIFI	DKINMA DRAHES DRIGHT RANU2	$n + {}^{12}C \rightarrow {}^9Be + \alpha$ $\rightarrow {}^8Be + n$ $\rightarrow 2\alpha + n$ の反応処理
CND11B	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$n + {}^{12}C \rightarrow {}^{11}B + d$ の反応処理
CNTOPB	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$n + {}^{12}C \rightarrow {}^{12}B + p$ の反応処理
CNXABE	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$n + {}^{12}C \rightarrow \alpha + {}^9Be$ の反応処理
CYCEND	MAIN		スペクトルデータに結果を収納する
CYREAC	MAIN	GEOM GEOMRZ GEOMSP IENCAL IENCAZ IENMOV ORT SIGMA	エネルギーポイントの計算、体系の 計算、反応率の計算、反応点の計算
DKINMA	CNA9BE CND11B CNTOPB CNXABE ES12C HE3DSB HE3HSB HNTONH IES12C ISCTAL ISKR78 REALP SCTAL SCTHE SCTKRN WALSTL		散乱角度とエネルギーの計算
DRAHES	CNA9BE CNXABE REALP SCTHE	DRIGHT DWEGMS DWEGMX STOPHE	${}^3He$ または ${}^4He$ の沈着エネルギーを 計算する。

サブルーチン名	上位ルーチン	下位ルーチン	機能概要
DRAHSB	CND11B CNTOPB HE3DSB HE3HSB HNTONH	DRIGHT DWEGMS DWEGMX STOPPR	p、d、t の沈着エネルギーを計算する。
DREAKT	MODIFI WALLMT	DRGAS1 DRGAS2 DRWAL1 DRWAL2	反応の種類を決定する。
DRGAS1	DREAKT	RANU2	NGAS=1 の場合に乱数により反応の種類を決定する。
DRGAS2	DREAKT	RANU2	NGAS=2 の場合に乱数により反応の種類を決定する。
DRIGHT	CNA9BE DRAHES DRAHSB MODIFI REALP WALSTL		散乱粒子の飛行方向を計算する。
DRWAL1	DREAKT	RANU2	NWALL=1 の場合に乱数により反応の種類を決定する。
DRWAL2	DREAKT	RANU2	NWALL=2 の場合に乱数により反応元素と反応の種類を決定する。
DWEGMS	DRAHES DRAHSB	SPH	球形での壁までの長さを求める。
DWEGMX	DRAHES DRAHSB		円筒形での壁までの長さを求める。
ENNEUT	MAIN	RANU2	線源の位置と方向を決定する。
ES12C	MODIFI	DKINMA	$^{12}\text{C}$ による弾性散乱を計算する。
GEOM	CYREAC	ZYL	飛行方向における境界面までの距離を求める。(既存円筒体系)
GEOMRZ	CYREAC	ZYLZ	飛行方向における境界面までの距離を求める。(汎用円筒体系)
GEOMSP	CYREAC	SPH	飛行方向における境界面までの距離を求める。(球体系)
HE3DSB	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$\text{n} + {}^3\text{He} \rightarrow \text{d} + \text{d}$ の反応処理
HE3HSB	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$\text{n} + {}^3\text{He} \rightarrow \text{p} + \text{t}$ の反応処理
HNTONH	MODIFI	DKINMA DRAHSB	$\text{n} + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{n}$ の反応処理
IENCAL	CYREAC MONPRM		計算するエネルギーが入る範囲を求める。
IENCAZ	CYREAC MONPRM		計算するエネルギーが入る範囲を求める。

サブルーチン名	上位ルーチン	下位ルーチン	機能概要
IENMOV	CYREAC		計算するエネルギーが入る範囲を再設定する。
IES12C	MODIFI	DKINMA	$n + {}^{12}C \rightarrow n' + {}^{12}C$ の反応処理
INIPAR	MAIN	QUELLE	計算パラメータの初期化
INIPRM	MAIN	RANINI	計算パラメータの初期化
INOUT	MAIN		入力データのコメントを除く。
ISCTAL	WALLAL	DKINMA	$n + Al \rightarrow n' + Al$ の反応処理
ISKR78	MODIFI	DKINMA	$n + Kr \rightarrow n' + Kr$ の反応処理
MAIN		CALDSB CYCEND CYREAC ENNEUT INIPAR INIPRM INOUT MODIFI MONPRM NRMDAT OUT41 OUT442 PTRACE RDCR20 RDCR21 RDCR23 RDCR25 RDDAT SETGAS SETWAL SOURCE STGEOM STOPRD	MAIN 処理
MODIFI	MAIN	CNA9BE CND11B CNTOPB CNXBABE DREAKT DRICHT ES12C HE3DSB HE3HSB HNTONH IES12C ISKR78 REALP SCTHE SCTKRN WALLMT	処理する反応を選択・処理する。
MONPRM	MAIN	IENCAL IENCAZ	モンテカルロ計算用変数の設定

サブルーチン名	上位ルーチン	下位ルーチン	機能概要
NRMDAT	MAIN		線源に対する補正処理
ORT	CYREAC	RANU2	次の反応位置と物質の計算処理
OUT41	MAIN		計算されたスペクトルデータの書き出し
OUT442	MAIN		計算結果の書き出し
PTRACE	MAIN		軌跡データの書き出し
QUELLE	INIPAR	RANU2	線源粒子のエネルギーを求める。
RANINI	INIPRM	RANMAR RMARIN	ランマー乱数の初期設定処理
RANMAR	RANINI RANU2		ランマー乱数の計算
RANU2	CAN9BE DRGAS1 DRGAS2 DRWAL1 DRWAL2 ENNEUT ISCTAL MODIFI ORT QUELLE REALP SOURNW SOURPS	RANMAR	乱数の計算
RDCR20	MAIN		H、C、Al の反応率データを読み込む。
RDCR21	MAIN		$^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 、Kr の反応率データを読み込む。
RDCR23	MAIN		Ni、Cr、Fe の反応率データを読み込む。
RDCR25	MAIN		Ni、Cr、Fe の反応率データを読み込む。
RDDAT	MAIN		計算制御用データを読み込む。
REALP	MODIFI	DKINMA DRAHES DRICHT RANU2	$\text{C} + \text{n} \rightarrow \text{n}' + \text{C}'$ $\rightarrow \text{Be} + \alpha$ $\rightarrow 3\alpha$ の反応処理
RMARIN	RANINI		ランマー乱数の初期設定
SCTAL	WALLAL	DKINMA	Al + n の弾性散乱の反応処理
SCTHE	MODIFI	DKINMA DRAHES	He + n の弾性散乱の反応処理
SCTKRN	MODIFI	DKINMA	Kr + n の弾性散乱の反応処理
SETGAS	MAIN		ガスの組成等を設定する。
SETWAL	MAIN	ADDIT	容器の組成等を設定する。
SIGMA	CYREAC		衝突断面積の計算を行う。
SOURCE	MAIN	SOURNW SOURPS	線源の設定を行う。
SOURNW	SOURCE	RANU2	線源の設定を行う。(拡張)

サブルーチン名	上位ルーチン	下位ルーチン	機能概要
SOURPS	SOURCE	RANU2	線源の設定を行う。(既存)
SPH	DWEGMS GEOMSP		球と飛行方向の交差点を求める。
STGEOM	MAIN		体系の読み込みを行う。
STGSML	STOPHE STOPPR		補正係数の処理を行う。
STOPHE	DRAHES	STGSML	He の阻止能を計算する。
STOPPR	MAIN	STGSML	p の阻止能を計算する。
STOPRD	MAIN	STGSML	阻止能の変数を読み込む。
WALLAL	WALLMT	ISCTAL SCTAL	Al での反応を計算する。
WALLMT	MODIFI	DREAKT WALLAL WALSTL	容器での反応を計算する。
WALSTL	WALLMT	DKINMA DRICHT	SUS での反応を計算する。
ZYL	GEOM		飛行方向での面との交点を求める (既存円筒)
ZYLRZ	GEOMRZ		飛行方向での面との交点を求める (汎用円筒)

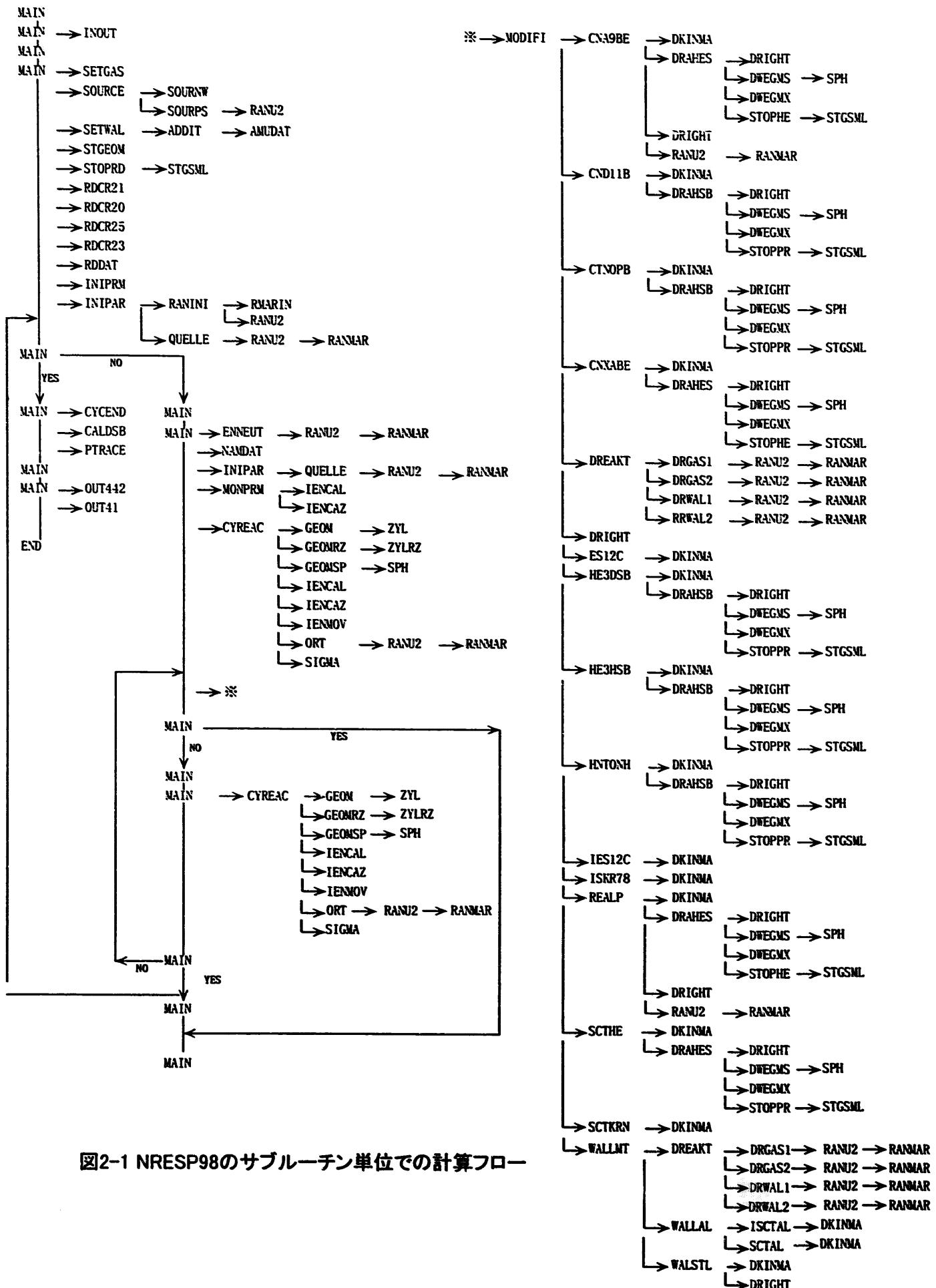


図2-1 NRESP98のサブルーチン単位での計算フロー

### 3.球形 BF<sub>3</sub>比例計数管の応答評価

#### 3.1 検出器の構造と試験条件

NRESP98 を検証するために、球形 BF<sub>3</sub> 比例計数管について、実線源による応答試験結果と NRRSP98 による計算結果を比較した。

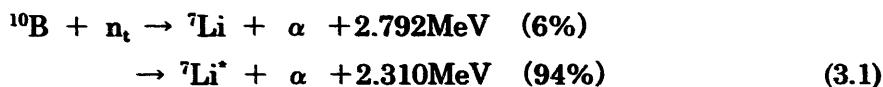
検証に用いた検出器は LND 社製の 2.5 インチ球形 BF<sub>3</sub> 比例計数管で、検出ガスとして <sup>10</sup>B 濃縮率 96% の BF<sub>3</sub> ガスを 200mmHg で充填したものを使用した。検出器の構造図を図 3-1 に、また仕様を表 3-1 に示す。

検出器の応答試験は大洗工学センターの低レベル校正施設で行った。中性子源としては同施設で保有する Am-Be 線源を用いた。線源-検出器中心間の距離は 40.5cm とし、また、速中性子成分を抑えるために検出器を減速材で覆った。減速材には、密度 0.9g/cm<sup>3</sup> のポリエチレンでできている、外半径 13.5cm、内半径 3.5cm、厚さ 10cm の球形のものを使用した。試験装置構成や試験回路構成などの試験状況を図 3-2 に示す。

#### 3.2 応答試験結果

応答試験の結果を図 3-3 に示す。

この結果の評価を行う前に、今後の議論のために BF<sub>3</sub> 比例計数管の出力に関して述べておく。BF<sub>3</sub> 比例計数管は、<sup>10</sup>B の熱中性子に対する核反応を用いており、その反応は以下のように記述される。



(3.1)式中、添字 t は中性子が熱中性子であることを示し、また\*は励起状態にあることを示す。これより BF<sub>3</sub> 比例計数管の出力スペクトルは図 3-4 に示すような形状をとるとされている。まず、この反応による放出エネルギーは二種類あり、したがって、検出器の出力スペクトルには全エネルギーピークが二本現れる。このエネルギーは反応生成物である二つの荷電粒子に与えられる。荷電粒子はその飛跡に沿って徐々にエネルギーを失うため、二つの荷電粒子の飛跡が全て有感領域に入ることにより。出力スペクトル上の全エネルギーピークを形成する。(図 3-4①参照) その一方で、二つの荷電粒子は運動量保存則に従い正反対方向に飛行する。したがって、検出器の壁付近で反応が発生した場合には、一方の荷電粒子が壁に吸収される場合が生じる。その場合には、壁に吸収されるまでのエネルギー一付与分ともう一方の荷電粒子のエネルギーが検出器出力となる。(図 3-4②③参照) この出力は吸収されない方の荷電粒子のエネルギーから反応の全エネルギーまでの間に分布し、検出器出力スペクトルにプラトーを形成する。これが壁効果と呼ばれる現象で、本稿では、壁効果によって出力スペクトル中に現れるプラート一部を壁効果プラートと呼ぶことにする。 $\alpha$  粒子と <sup>7</sup>Li 粒子のエネルギーは異なるため、壁効果プラートは二段構造になる。

さて、試験結果を見ると、壁効果プラート一部、及び 2 本の全エネルギーピークが明確に現れており、図 3-4 に示した BF<sub>3</sub> 比例計数管の出力例とほぼ同様のスペクトルが描かれた。

この結果は十分に適切なものであると判断し、この結果に基づいて計算結果との比較検証を行った。

### 3.3 検証(1)

この段階で、NRESP98 による計算結果と試験結果の比較を行った。計算で使用した体系を図 3-5 に示す。検出器及び減速材は球体で近似し、検出器壁の材質は本来はステンレス鋼であるが、熱中性子の輸送に対して大きな影響は与えないものとみなして鉄に置き換えた。線源については、減速材を含めた検出器の断面と同形の面線源とし、中性子は線源の任意の位置から任意の方向に放射されるものとした。ただし、減速材に入射しない方向に放射されたケースについては計算を行わない。計算結果を図 3-6 に示す。

図 3-3 と図 3-6 を比較すると、壁効果の影響や全エネルギーピークの存在など  $\text{BF}_3$  比例計数管の出力スペクトルの基本的な形状は計算で再現されていることがわかる。検出器内で発生している主要な核反応については、計算で再現されているであろうことが示されている。しかし、全エネルギーピークの広がり、壁効果プラトーの傾き、壁効果プラトー未満のエネルギー範囲の係数など、出力スペクトルを形成する細かい要素がまだ十分に再現されていない。したがって、ピーク高、壁効果プラート高に関する比較など定量的な検証を行えるほど十分には再現がなされていない。

検出原理から、計算結果のスペクトル形状は妥当な形状であり、試験結果と計算結果の相違は主に検出器におけるスペクトルの形成過程において生じていると考えられた。そこで、出力スペクトルに影響を与える要因について検討した。

### 3.4 統計分散の補正

放射線の検出過程は一般に確率事象であり、統計的な分散の影響を受ける。比例計数管の出力を評価する場合には、以下の 2 種類の影響を考慮すれば良い。第一には一連の反応によって生成する電子数の分散であり、もう一つは電子の增幅過程における增幅率の分散である。電子の生成過程は独立の確率事象が多数発生しており、生成数は理論的にはガウス分布に従うが、実際は検出器ごとに固有の分散を示す。ガウス分布と検出器固有の分布の分散の比は、ファン因子と呼ばれ、検出器の能力を示す一つの指標として知られている。また、増幅率の分散についても、検出器固有の分布を形成する。この分布はポルヤ分布と呼ばれている。

以上の影響について定式化を行う。まず、電子生成量の相対分散はファン因子を用いて以下のように表される。

$$(\sigma_n/n)^2 = F/n \quad (3.2)$$

$\sigma_n$  : 電子生成数の標準偏差

$n$  : 電子生成数

$F$  : ファン因子

また、增幅率の相対分散については、十分大きな增幅率に対してポルヤ分布パラメータを用いて以下のように表される。

$$(\sigma_A/A)^2 = b \quad (3.3)$$

$\sigma_A$  : 単一電子の増幅率の標準偏差

$$\left( = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{Ai}^2 \right) \right)^{1/2} \quad \text{ただし } \sigma_{Ai} : \text{電子 } i \text{ の増幅率の分散}$$

$A$  : 平均増幅率

$$\left( = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ai \quad \text{ただし } Ai : \text{電子 } i \text{ の増幅率} \right)$$

$b$  : ポルヤ分布パラメータ

さて、検出器の単位パルス出力の電荷量は以下のように表現できる。

$$Q = n \cdot e \cdot A \quad (3.4)$$

$Q$  : 単位パルス出力の電荷量

$e$  : 単位電荷量

これより、単位パルス出力の電荷量の相対分散は以下のように表現される。

$$(\sigma_Q/Q)^2 = (\sigma_n/n)^2 + (\sigma_A/A)^2 \quad (3.5)$$

$\sigma_Q$  : 単位パルス出力の電荷量の標準偏差

$\sigma_A$  : 平均増幅率の標準偏差

ここで、 $A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ai$  より

$$\begin{aligned} \sigma_A^2 &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sigma_{Ai}^2 \\ &= \frac{1}{n} \sigma_A^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

したがって、式 (3.2)、(3.3)、(3.6) より

$$\begin{aligned} (\sigma_Q/Q)^2 &= (\sigma_n/n)^2 + (\sigma_A/A)^2/n \\ &= F/n + b/n \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで、 $n = E/W$  ( $E$  : 入射エネルギー、 $W$  : 平均イオン対生成エネルギー) であることから

$$\sigma_Q/Q = (W(F+b)/E)^{1/2} \quad (3.8)$$

したがって

$$\sigma_Q = Q \cdot ((W(F+b))/E)^{1/2} \quad (3.9)$$

一般に比例計数管の場合には、 $F$  は 0.05~0.2、 $b$  は 0.4~0.7 と言われている<sup>⑧</sup>。ここでは、これを簡便化し、さらに検出回路における固有の分散も考慮して、以下の式を導き、試験結果との比較から統計的分散の評価を行った。

$$\sigma = a \cdot E^{-1/2} + b \quad (3.10)$$

$\sigma$  : 検出器出力に現れる総合的な標準偏差

a,b : 分散補正のための値

式(3.10)に基づき、試験結果の全エネルギーピークの広がり、壁効果プラトーの立ち上がり部分の広がりを目安に分散補正值を決め、計算を行った。結果を図3-7に示す。

全エネルギーピークに着目して検討してみる。計算結果では、全エネルギーの低エネルギー側と高エネルギー側にはほぼ同程度の広がりが表れ、ガウス分布が再現されているが、試験結果では、低エネルギー側よりも高エネルギー側に大きな広がりを持っていることがわかる。また、影効果プラトーの立ち上がりの部分においても、ここも統計的分散の影響を受けると考えられるが、計算結果ほど試験結果は広がりを持っていない。このことから、統計的分散の影響がないわけではないが、その影響が全てではなく、この他に、出力スペクトルを高エネルギー側に歪ませる、他の要因の影響が働いていると考えられた。

### 3.5 電界分布の影響

比例計数管では、端効果と呼ばれる現象があることが知られている。端効果は一般に円筒形比例計数管において、検出器の軸方向中央付近では内部の電界分布がほぼ均一であり増幅率も軸方向に均一な分布を示すのに対し、検出器端部付近では検出器構造（検出器壁や端部近傍の導電性構造物など）の影響により電界が歪み、増幅率が中央付近に比べて変動し、検出器出力スペクトルを変形させる事象である。

このような電界の歪みは円筒形比例計数管では検出器端部のみに見られる現象だが、本稿で検討している球形比例計数管の場合には、陽極線（芯線）と陰極（検出器壁）の間の距離が一定ではなく、また端部付近では陽極線と陰極の間の距離が極端に狭くなっていることも想定できるため、検出器内全体において電界分布は必ずしも一様ではなく、むしろ何らかの歪みを持っていると想定できる。さらに、両極の電位差は同じでも、電極間距離が狭まればそこにかかる電界強度は増し、その結果増幅率も増加すると考えられる。これは、応答試験結果において、出力スペクトルが高エネルギー側に広がっていることと矛盾しない。

以上より、検出器内の電界分布及び増幅率の分布を評価してみた。

#### 3.5.1 検出器内の電界分布

最初に、検出器内の電界分布の評価を行った。

球形陰極内の電界分布の評価には、市販のプログラム集<sup>9)</sup>にある有限要素法を用いた軸対象体系における電界分布評価プログラムを使用した。また、検出器両端に円柱状の構造物があるため、陰極は球体に円柱が軸方向に貫通した形状とし、球体部分について有限要素法による電界分布評価を適用し、円柱部分については無限円筒体系における電界分布の式(3.11)で補正した。

$$E(r) = V_0 / (r \cdot \ln(b/a)) \quad (3.11)$$

$E(r)$  : 位置  $r$  における電界強度 (V/cm)

$V_0$  : 電極間電圧 (V)

$r$  : 評価位置半径 (cm)

$a$  : 陽極線半径 (cm)

$b$  : 陰極半径 (cm)

なお、陽極線は直径 0.00254cm ( $10^{-3}$ inch) の円柱と仮定した。評価体系を図 3-8 に、また評価結果を表 3-3 及び図 3-9 に示す。なお、図 3-1 には端効果を抑制するためのフィールドチューブが示されているが、この段階ではフィールドチューブの影響は無視した。フィールドチューブの影響については 3-6 項で評価する。

検出器中央部より端部に向かって緩やかに電界強度が増加することが示された。次に、これに基づいて検出器内での増幅率分布の評価を行った。

### 3.5.2 検出器内の増幅率分布

ガス増幅過程については、「Townsend の電子雪崩」を想定し、式 (3.12) に示す Townsend の式にしたがって電子が増加するものとした。

$$dn/n = \alpha \cdot dx \quad (3.12)$$

$\alpha$  : 電子の衝突電離係数

(電子 1 個が電界と逆方向に 1cm 進む間に衝突により気体分子を電離する平均回数と定義される。)

$n$  : 電子数

$x$  : 電子の移動距離

式 (3.12) を展開すると、ガス増幅率  $M = n/n_0$  について以下の式が導かれる。

$$\ln(M) = \int \alpha \cdot dx \quad (3.13)$$

さらに  $\alpha$  に関しては、Townsend によって提唱された式 (3.14) を用いるものとした。

$$\alpha/p = A \cdot \exp(-B \cdot (p/E)) \quad (3.14)$$

$A$  : 気体の種類に基づく定数 ( $\text{cm}^{-1}$ )

$B$  : 気体の種類に基づく定数 (V/cm · mmHg)

$p$  : 気体の圧力 (mmHg)

$E$  : 電界強度 (V/cm)

なお、定数  $A, B$  については、Townsend により表 3-2 に示す値が与えられている<sup>10</sup>が、これまでの調査では  $\text{BF}_3$  ガスに関する値が得られなかったため、暫定的に空気の値を使用し、後に試験結果に示された全エネルギーピークの高エネルギー側の傾きを再現できるように補正することにした。

表 3-2 ガス増幅率評価に用いる定数値

ガス種類	A [cm <sup>-1</sup> ]	B [V/cm・mmHg]	適用範囲 相対電界強度 [V/cm・mmHg]
空気	14.6	365	150～600
N <sub>2</sub>	12.4	342	150～600
H <sub>2</sub>	5.0	130	150～400
Ar	13.6	235	100～600
He	2.8	34	20～150

以上の評価を、図 3-9 に示した電界分布に加味して、増幅率分布を示すデータテーブルを作成した。その際に、検出器内の任意の位置で発生した自由電子は電界分布評価で用いた各要素を電気力線に沿って移動し、電子が各要素の接点にいる場合にはその接点の、また各要素内にいる場合にはその要素の電界強度により増幅作用を受けるものとし、陽極線に達するまでの移動経路で受ける増幅量を積算し、各発生位置における増幅率とした。増幅率分布を表 3-4 及び図 3-10 に示す。

増幅率分布を加味して計算した結果を図 3-11 に示す。ここで、式 (3.14) の定数 A、B は、暫定的に空気の値である 14.6、365 を適用し、後に試験結果との比較検討を行い、A の値を約 1/4 の 3.6 に設定した。また、統計分散の補正も行っている。この結果、全エネルギー ピークの形状を良く再現できていることがわかる。

### 3.6 荷電粒子の輸送計算に関する検討

前項までの評価結果と試験結果を比較してみると、全エネルギー ピークに関しては良く評価できたものの、壁効果プラトーにある 2 種類のプラトー間の段差や壁効果プラトー未満のエネルギー領域における計数の評価はまだ不十分であると考えられた。特に、壁効果による 2 段のプラトーの高さの関係が試験結果と計算結果で異なっている。そこで、次に直接信号を形作る二次荷電粒子に関する評価について検討を行った。

#### 3.6.1 阻止能の評価

荷電粒子の飛程に関しては、2-3 項で示したように、文献に示されているデータならびに荷電粒子の阻止能について記述した古典的な式である Bethe の式を用いた。具体的には、The Stopping and Range of Ions in Matter のうち、陽子の阻止能データは「Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements」<sup>6)</sup>、また、 $\alpha$  粒子の阻止能データは「Helium Stopping Powers and Ranges in All Element Matter」<sup>7)</sup>からそれぞれ必要なデータを引用した。さらに、<sup>10</sup>B の残留核である <sup>7</sup>Li については上記の  $\alpha$  粒子に関するデータを Bethe の式に基づき補正することで、阻止能データを導いていた。

しかし、Bethe の式は粒子の速度が十分に大きい場合については有効だが、荷電粒子と媒質の原子との間での電荷交換が重要になるような低い速度の荷電粒子に関しては成立しなくなるとされている。そこで、Li の阻止能について改めて検討した。

種々の重イオンの比エネルギー損失に関するグラフ（放射線計測ハンドブック第2版<sup>8)</sup> 図2.11）を参考にし、Liの阻止能を改めて推定することにした。（図3-12に引用）このグラフは、各々の重イオンについてその電荷と質量について補正した上で、アルミニウム中における比エネルギー損失を比較したものである。入射粒子のエネルギーが高い場合にはどの粒子も同様の比エネルギー損失だが、エネルギーが低くなってくると核種毎に比エネルギー損失が異なってくることが示されている。このグラフ中には、Liのデータは記載されていないが、H、He、B、Cと原子番号の増加に従う規則的な傾向が現れていることから、Liに関するデータを推定することにした。そこで、Liの阻止能は、 $\alpha$ 粒子の阻止能を Bethe式より補正したものとするが、1MeV/amu未満の範囲についてはさらに係数0.5をかけるものとした。

その結果を、図3-13に示す。Liに対する阻止能は、Bethe式だけから推定した場合よりも $\alpha$ 粒子の阻止能に近いものと評価された。

### 3.6.2 荷電粒子の挙動

荷電粒子の検出器内での挙動についても改めて検討を行った。

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で生成する $\alpha$ 粒子と $^7\text{Li}$ 粒子は正反対の方向に直線的に、それぞれの飛程分飛行し、その行程において比エネルギー損失に応じたエネルギーを検出器に付与する。また、各粒子が壁に到達する場合にはそこまでのエネルギー付与を評価し、壁に到達した時点で計算を止めており、その時点で粒子は消滅したと評価している。

ところが、実際に検出器の構造を見直してみると、陽極線には図3-1で示したように端効果を抑制するためのフィールドチューブが設けられている。検出器内に付与されたエネルギーのうち、フィールドチューブのある領域の陽極線に収集される電荷は検出器出力にならない構造となっている。すなわち、検出器内にも不感領域が存在するということである。この位置に入射した荷電粒子は、検出器出力に寄与しないことになる。図3-14に検出器内での荷電粒子の挙動に関する説明を示す。図3-14は、図3-4に不感領域で発生が生じた場合の信号形成過程を示したものである。不感領域で発生した反応のエネルギーは不感領域内でもエネルギーを失い、検出器出力としては壁効果プラトー領域よりも低いエネルギー領域に出力を与えることになる。

そこで、電荷の付与位置に対応して陽極線に電荷が収集される位置の情報を与え、フィールドチューブの領域に収集される電荷については計数として扱わないようにした。この結果、壁効果プラトー領域未満のエネルギー領域における計数についても評価できる見通しがついた。

3.6.1項及び3.6.2項の評価を加味した計算評価結果を、図3-15に示す。まだ、壁効果プラトー領域未満のエネルギー範囲に関する評価が十分ではない部分はあるが、これは、複雑な構造と電界分布を持つであろう検出器端部の構造を単純化していることなどによる。ただし、この部分の相違は全体の計数に対してごくわずかな量（1%未満）であり、また球

形  $\text{BF}_3$  比例計数管の計数として使われる領域が全エネルギーピークと壁効果プラトーの部分であることを考えると、ほぼ適切にスペクトル形状が再現されたといえる。

### 3-7 検証(2)

図 3-16 に計算結果と試験結果の比較を示す。比較は、計算結果について、試験結果とともに  $2.31\text{MeV}$  ピークと  $\alpha$  吸収壁効果プラトーの肩でチャネルを補正し、試験時間の計数を想定して比較した。検出器出力スペクトルの形状を良く評価していることがわかる。これを定量的に評価した結果を表 3-5 に示す。

表 3-5 応答評価計算結果と応答試験結果の比較

	計算結果	試験結果	計算結果/試験結果
二つの全エネルギーピークのピーク高 $H_{pe}$ の比 $H_{pe_{2.310\text{MeV}}}/H_{pe_{2.792\text{MeV}}}$	0.042	0.044	0.956
壁効果プラトー高 $H_{pl}$ の比 $H_{pl_{7\text{Li} \text{吸収}}}/H_{pl_{\alpha \text{吸収}}}$	1.63	1.48	1.10
全エネルギーピーク高と壁効果プラトー高の比 $H_{pe_{2.310\text{MeV}}}/H_{pl_{\alpha \text{吸収}}}$	10.11	9.43	1.07
全計数率 [cps/flux]	1.406	1.466	0.959

注.  $H_{pe_{2.310\text{MeV}}}$ 、 $H_{pe_{2.792\text{MeV}}}$ 、 $H_{pl_{7\text{Li} \text{吸収}}}$ 、 $H_{pl_{\alpha \text{吸収}}}$ については、図 3-4 を参照。

全エネルギーピーク高や壁効果プラトー高の関係、全計数率について、応答評価計算結果と試験結果は  $\pm 10\%$  以内で良く一致しており、球形  $\text{BF}_3$  比例計数管の応答を的確に評価することができた。

表 3-1 球形 BF<sub>3</sub> 比例計数管仕様

型式	LND27057
シリアル番号	71128
構造仕様	
ガス種類	BF <sub>3</sub> ( <sup>10</sup> B 96%濃縮)
ガス圧力	200torr(266.6hPa)
検出器外径	50.8mm(2.00inch)
検出器長さ	115.3mm(4.54inch)
検出部実効径	49.78mm(1.96inch)
陰極材質	ステンレス鋼
出力コネクタ	SHV
動作温度	-50°C~100°C
電気仕様 (1998.6.2 現在)	
動作電圧範囲	700~950V
最適動作電圧	817V
プラトー傾斜	<3%/100V
FWHM	5.144%
静電容量	4.0pF
標準パルス波高	1mV
標準パルス電荷	$1 \times 10^{-13}C$

データはLND社より提供されたデータシートによる

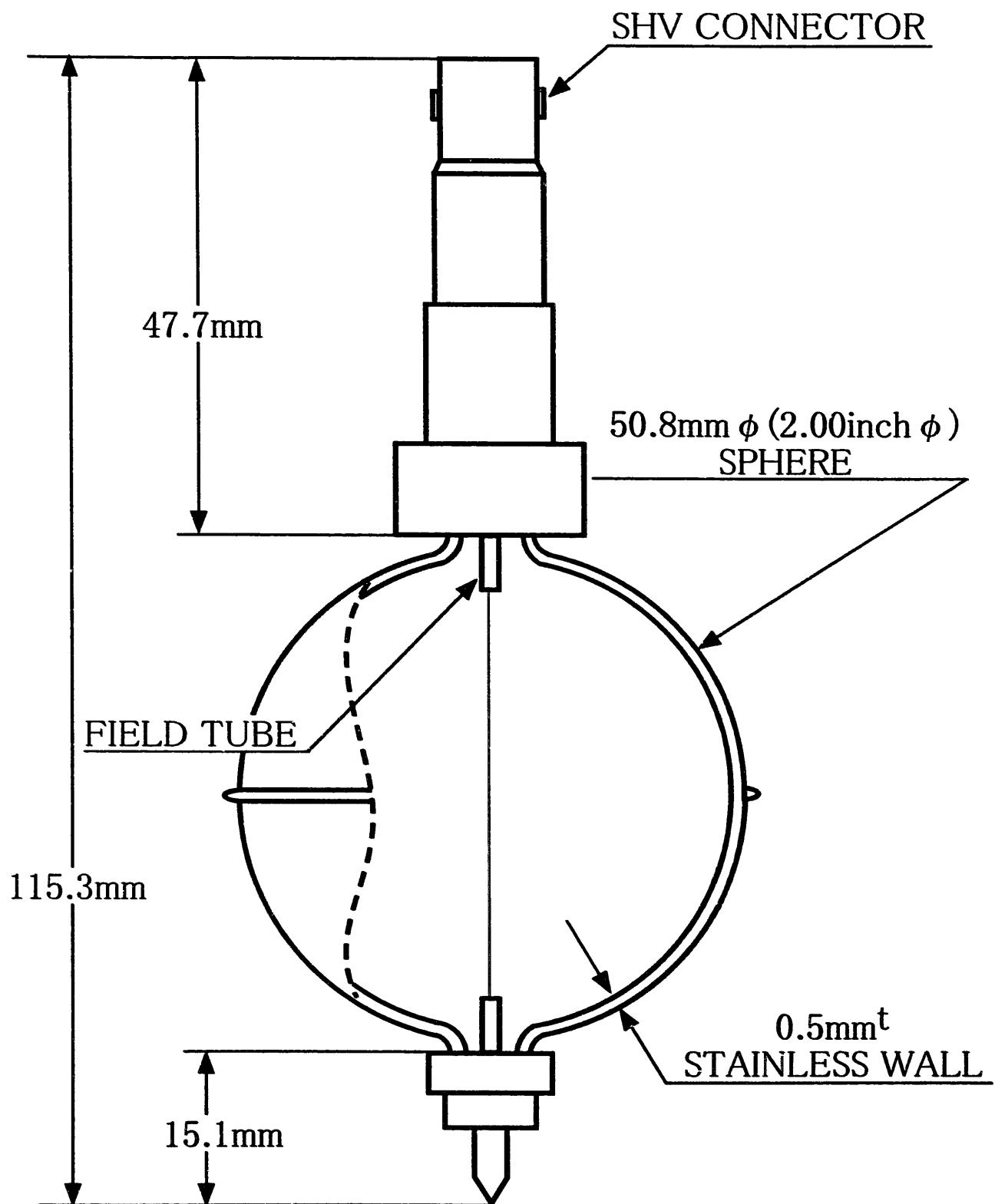


図3-1 球形BF<sub>3</sub>ガス比例計数管構造図

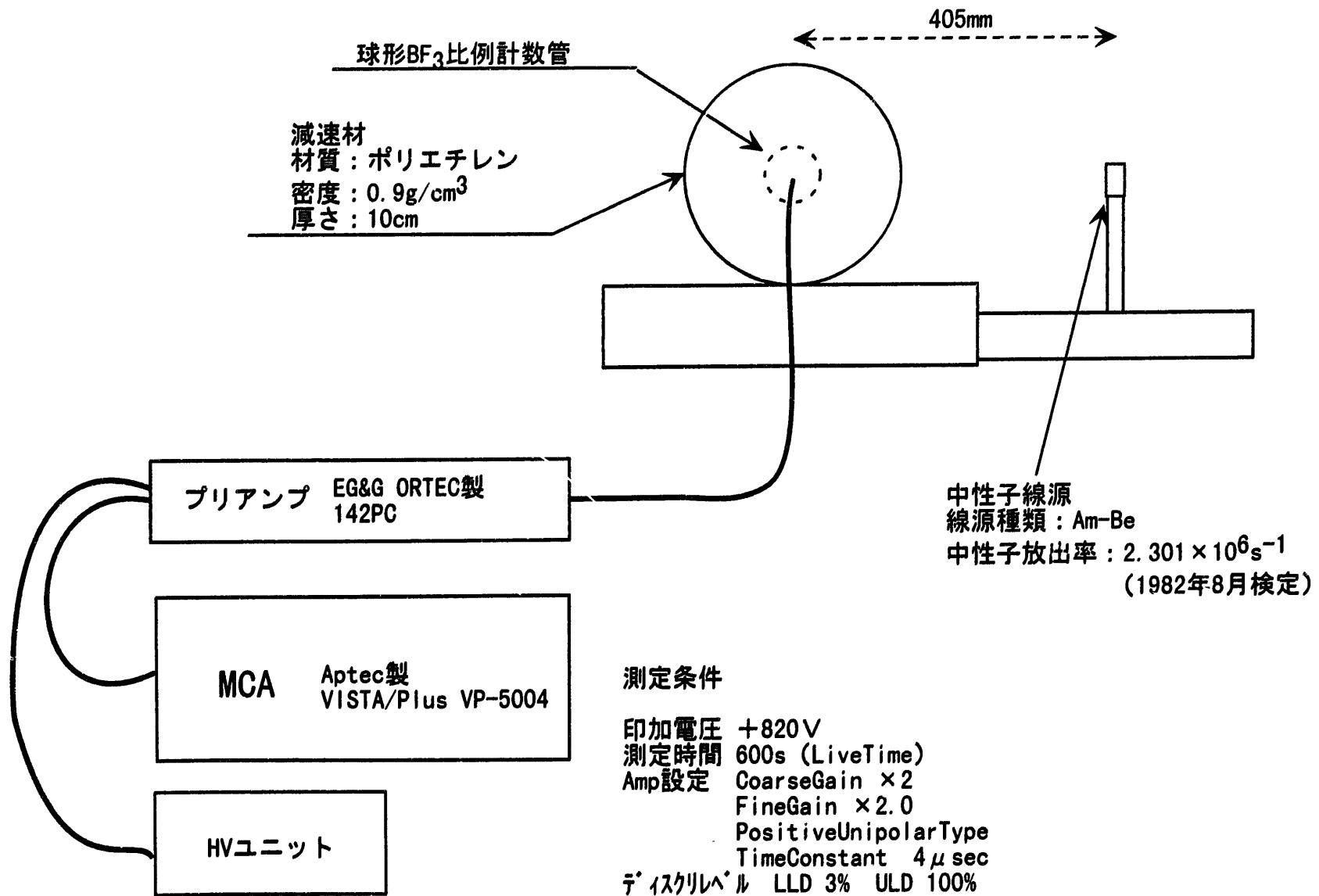
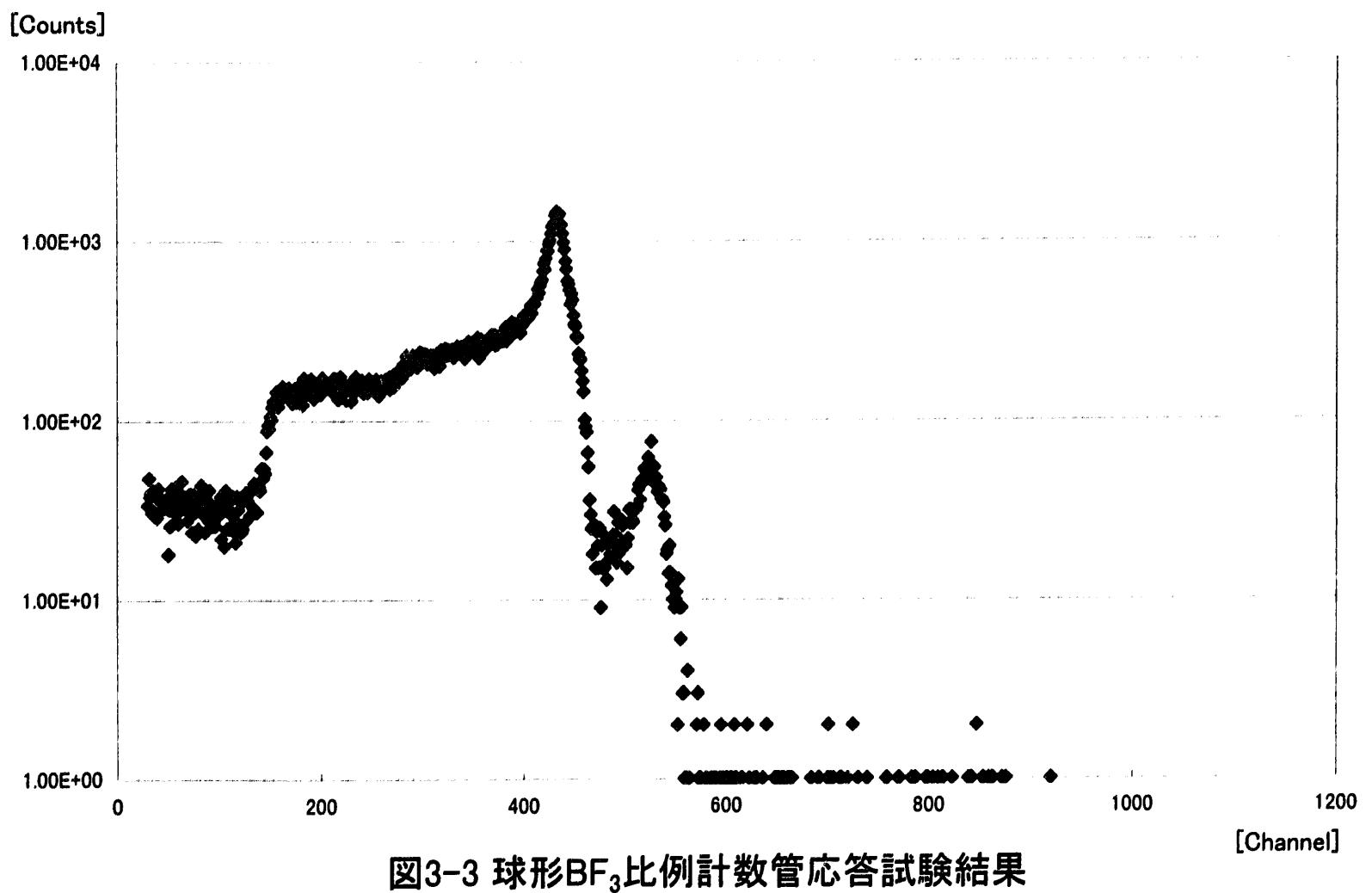


図3-2 試験状況図

図3-3 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答試験結果

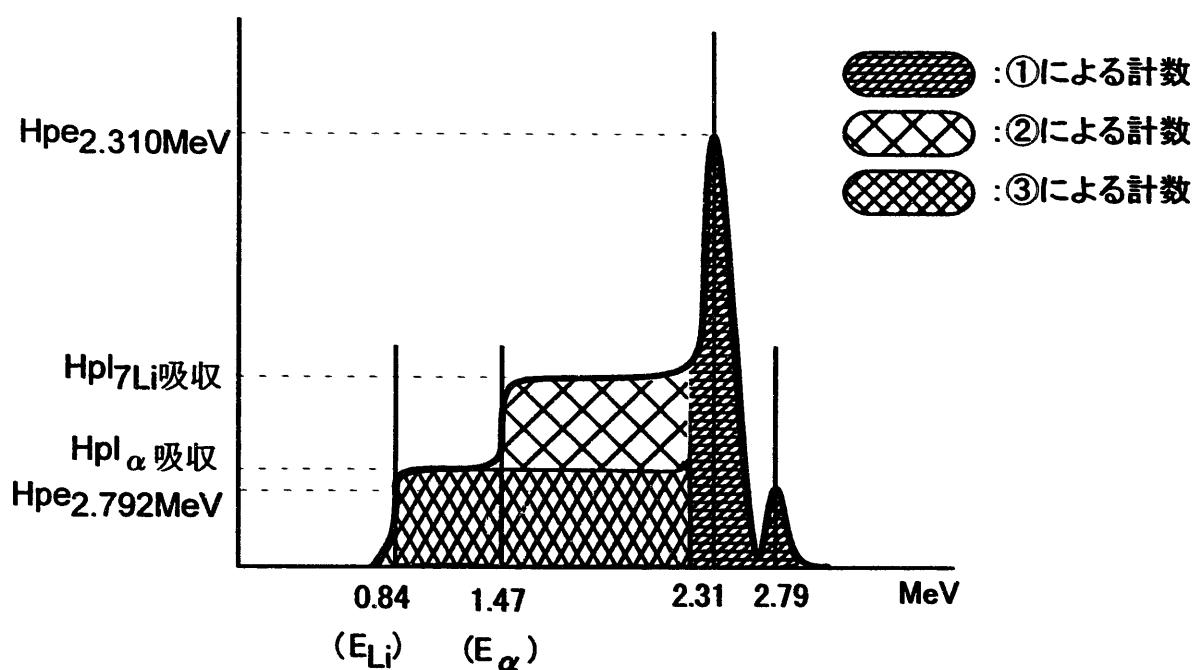
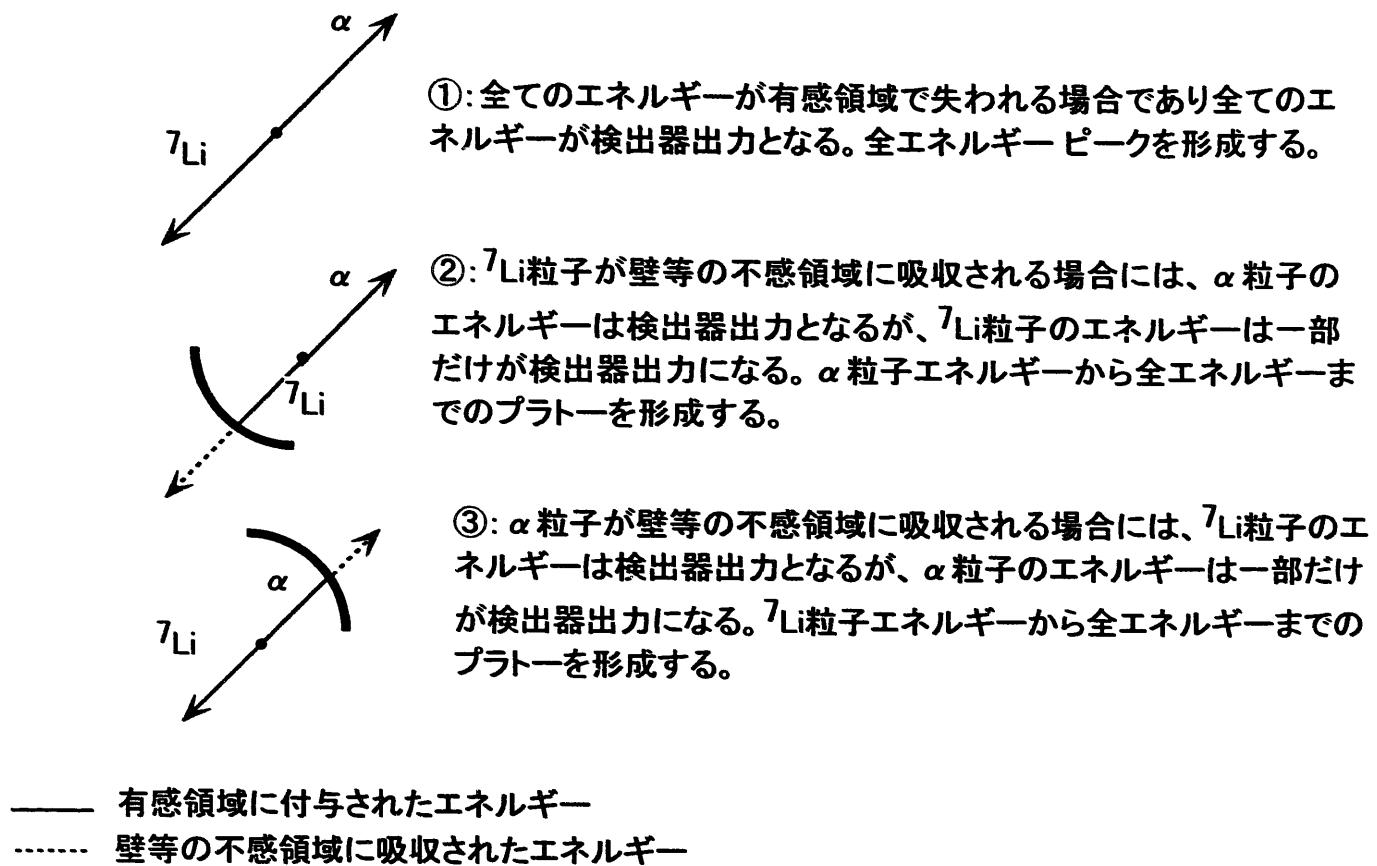


図3-4  $\text{BF}_3$ 比例計数管の出力例

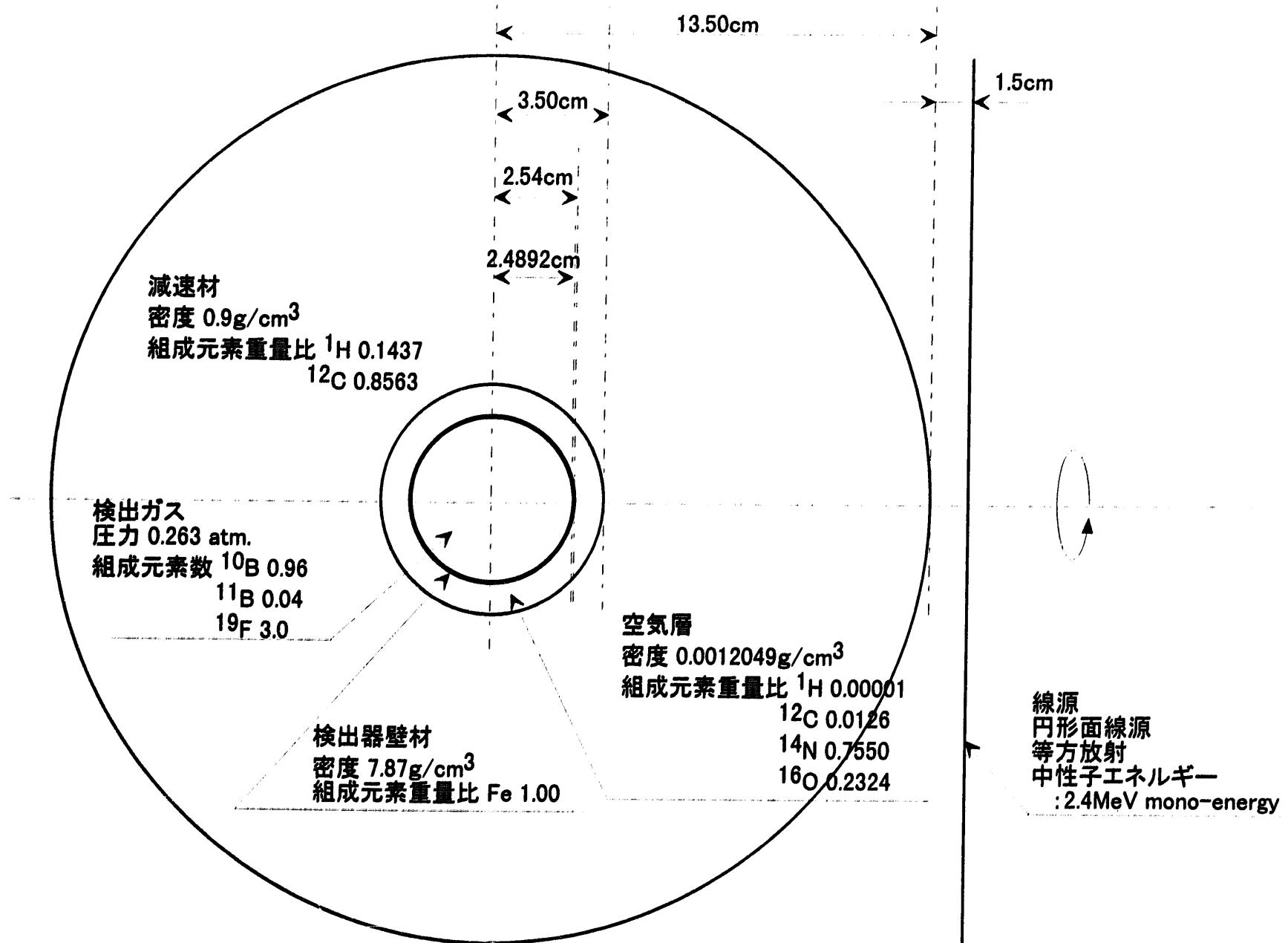


図3-5 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答評価計算体系図

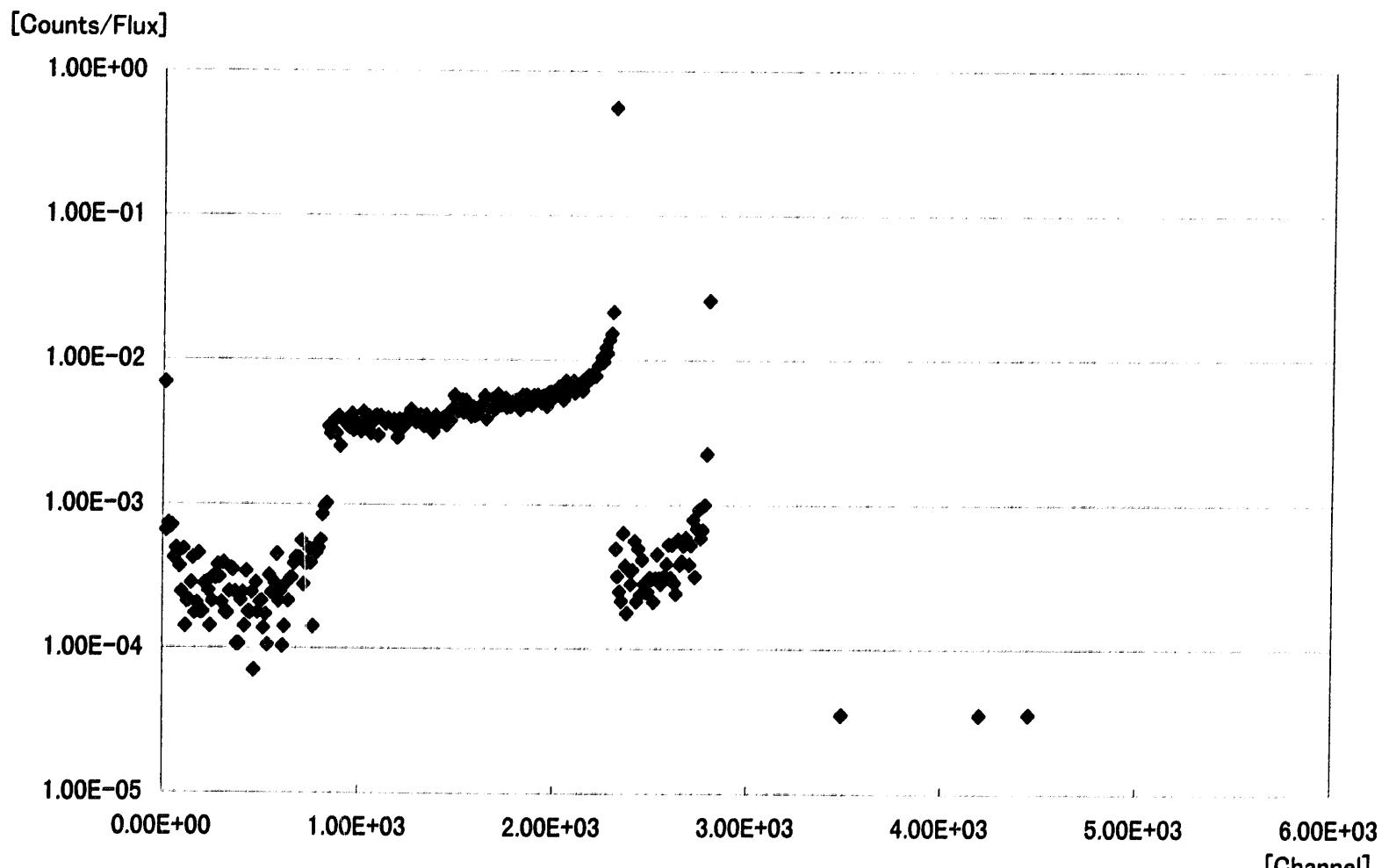


図3-6 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答評価計算結果(その1)  
[反応によるエネルギー付与のみ評価]

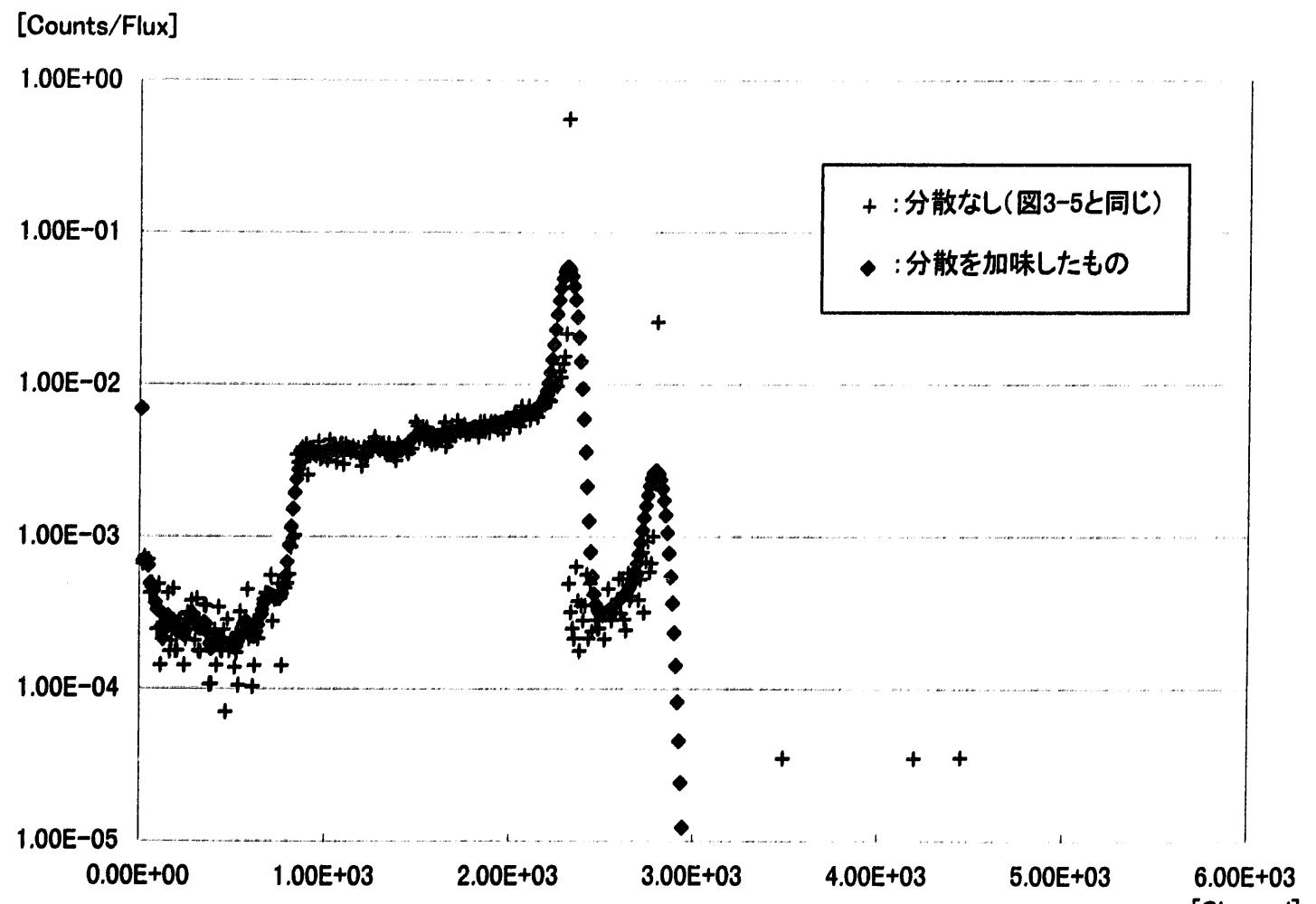


図3-7 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答評価計算結果(その2)  
[統計的分散の影響を加味したもの]

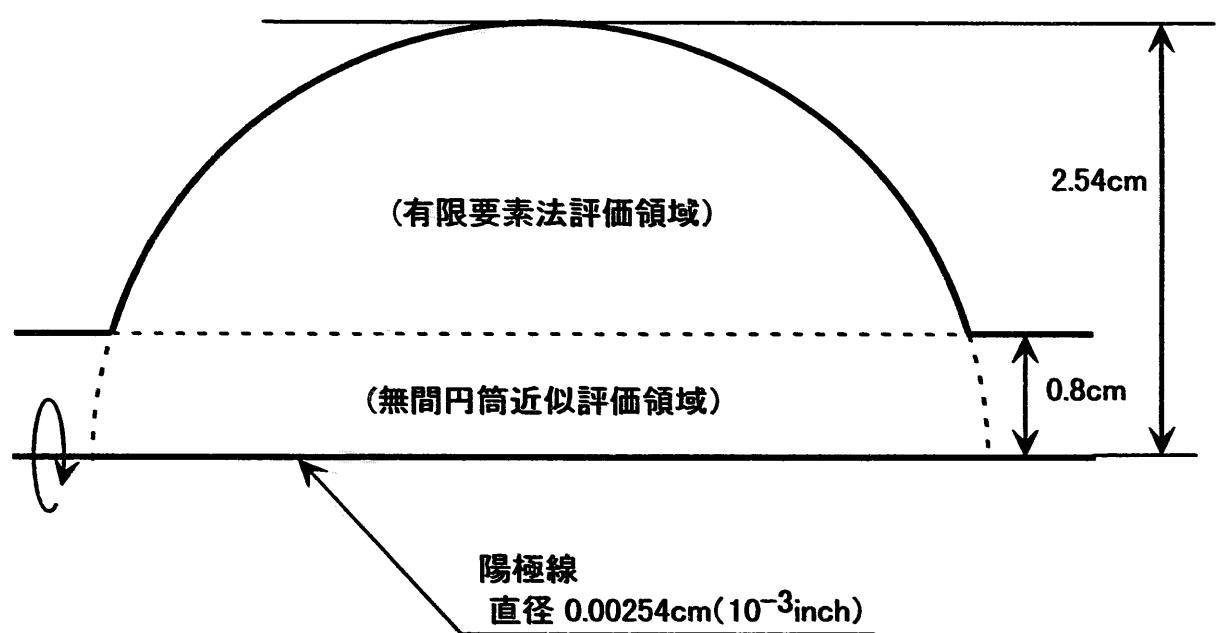
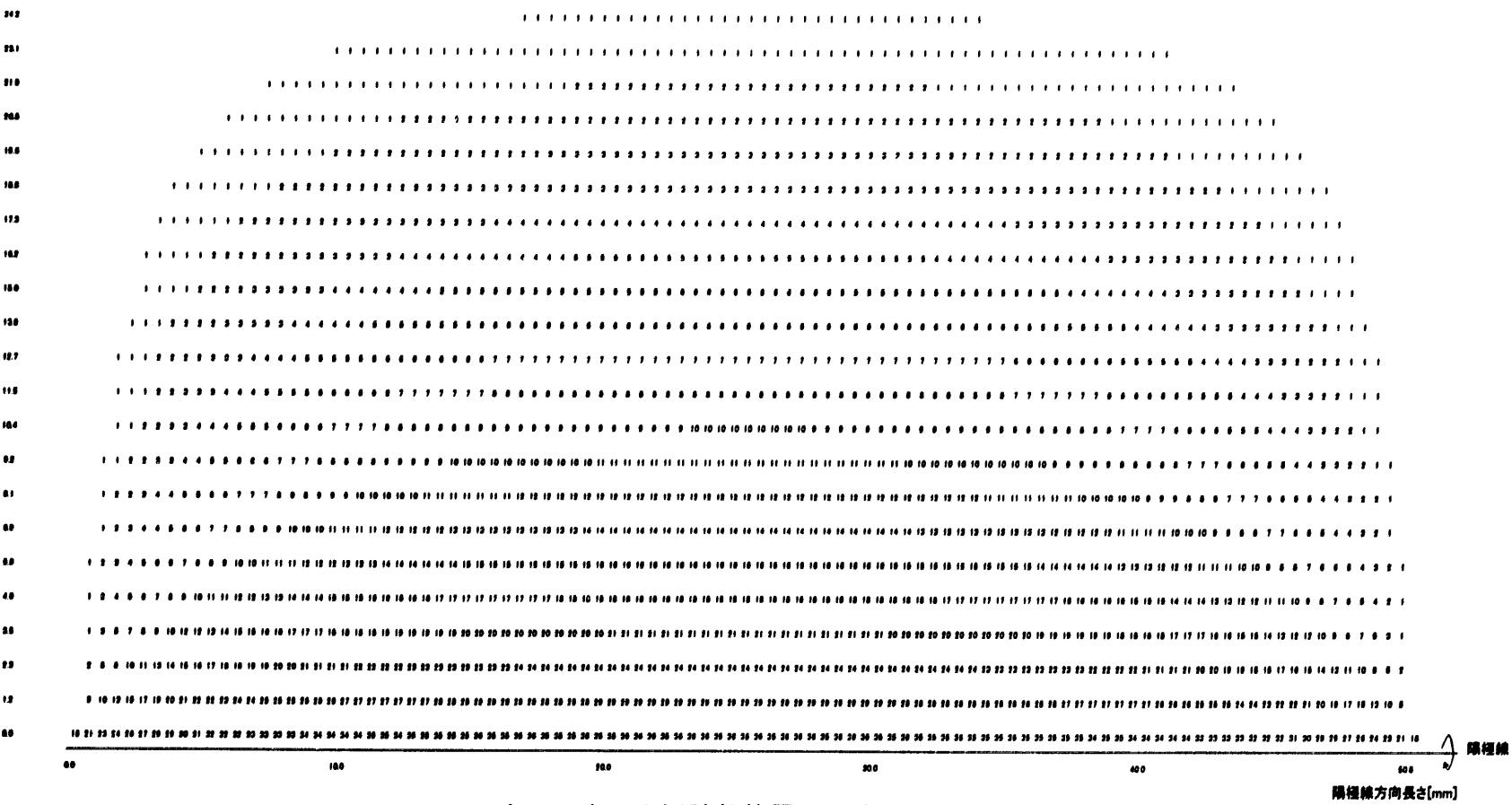


図3-8 球形比例計数管電界分布評価体系

陽極線中心からの距離[mm]



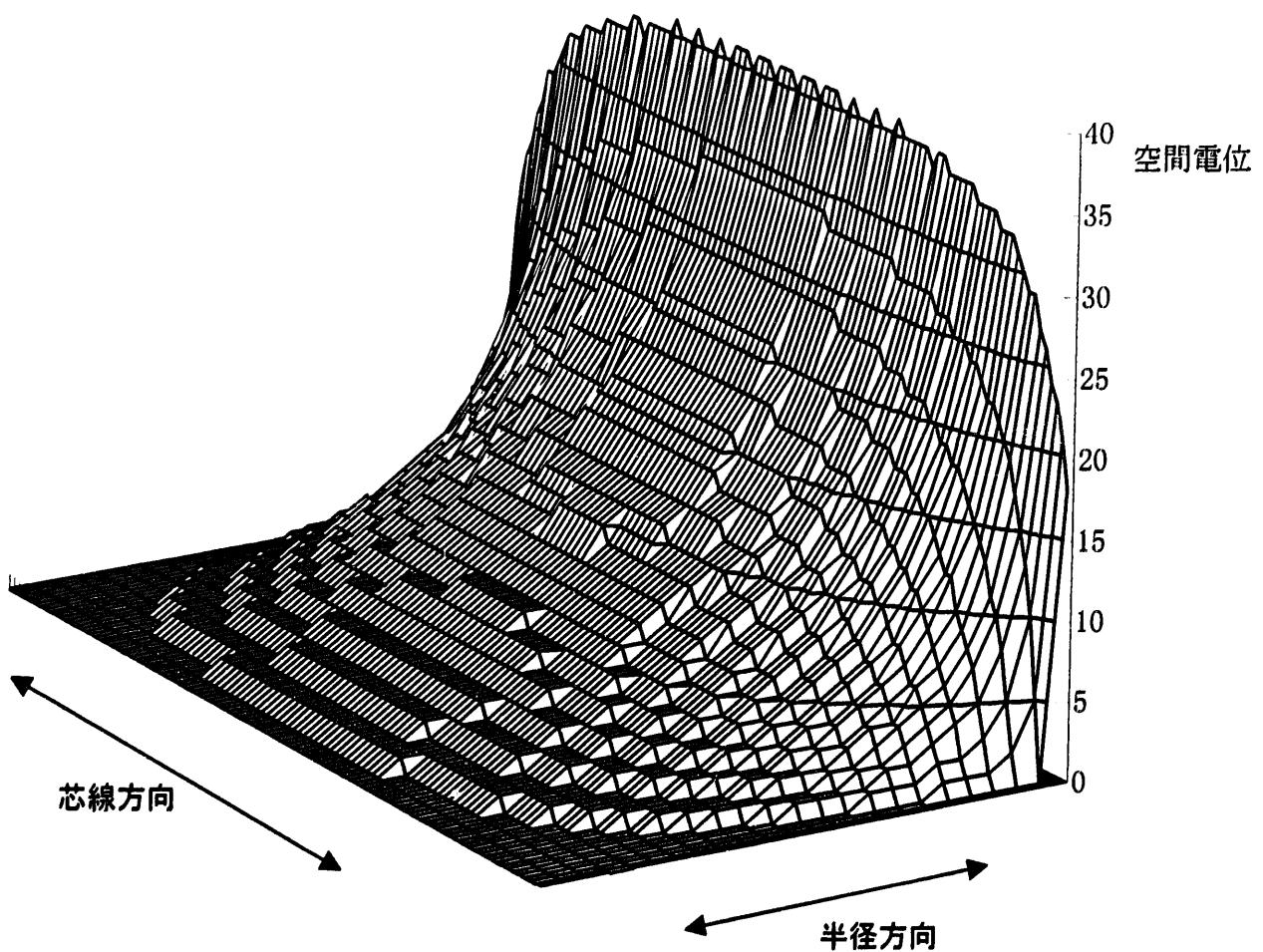


図3-9 球形比例計数管電界分布評価結果

陽極線からの距離[mm]

24.9	4.8 4.8 5.1 4.8 4.5 4.8 5.0 4.5 5.0 4.8 4.5 4.8 5.1 4.8 4.8
23.6	4.9 4.8 4.8 5.0 4.8 4.5 4.8 5.0 4.5 5.0 4.8 4.5 4.8 5.0 4.8 4.8
22.3	4.8 4.8 4.9 5.0 4.7 4.8 5.0 4.8 4.5 4.8 5.0 4.5 5.0 4.8 4.5 4.8
21.0	4.9 5.2 4.8 4.7 5.1 4.9 4.8 4.9 4.9 4.5 4.8 5.0 4.5 5.0 4.8 4.5
19.7	4.8 4.8 5.1 5.1 4.6 4.9 5.0 4.8 4.8 5.0 4.5 4.7 5.0 4.5 4.7 4.5
18.4	5.3 5.3 4.9 4.9 5.3 4.9 4.7 4.7 5.0 4.5 4.7 5.0 4.5 5.0 4.7 4.7
17.0	5.1 5.0 5.3 5.3 4.8 5.0 5.1 4.6 5.0 4.9 4.8 5.0 4.6 5.0 4.8 4.6
15.7	5.4 5.7 5.1 5.0 5.4 5.1 4.8 4.8 5.0 4.8 5.0 4.7 4.6 5.0 4.5 5.0
14.4	5.8 5.2 5.4 5.6 5.0 5.1 5.3 4.8 5.1 5.0 4.7 5.1 4.8 4.9 4.8 4.6
13.1	5.5 5.7 5.8 5.2 5.5 5.4 5.0 5.3 5.0 4.9 5.1 4.8 4.7 4.8 4.5 5.0
11.8	5.8 6.4 5.5 5.7 5.7 5.2 5.7 5.2 5.1 5.2 4.8 5.3 4.8 4.7 4.9 4.5
10.5	6.8 7.5 6.8 7.0 7.0 6.6 5.8 6.4 5.5 5.8 5.4 5.4 5.5 5.0 5.4 4.8
9.2	6.8 7.5 6.8 7.0 6.9 6.2 6.5 5.9 6.1 5.8 5.9 5.2 5.7 5.0 5.3 4.9
7.9	6.8 7.5 6.7 7.1 6.7 6.4 6.7 5.9 6.3 5.5 5.9 5.3 5.5 5.2 5.2 5.1
6.6	6.8 7.8 6.7 7.2 6.6 6.7 6.4 6.2 6.1 5.8 5.7 5.5 5.4 5.4 5.1 5.2 4.9
5.3	6.8 7.8 6.7 7.3 6.5 6.9 6.3 6.5 5.9 6.1 5.6 5.7 5.3 5.5 5.0 5.3 4.8
4.5	6.8 7.6 6.7 7.4 6.5 7.0 6.2 6.6 5.9 6.2 5.5 5.8 5.0 5.4 4.8 5.2 4.6
3.7	6.8 7.6 6.7 7.4 6.5 7.0 6.2 6.6 5.8 6.2 5.5 5.9 5.2 5.6 5.0 4.8 5.1
2.9	6.8 7.6 6.7 7.4 6.5 7.1 6.2 6.7 5.8 6.3 5.5 5.9 5.2 5.6 5.0 4.8 5.1
2.1	6.8 7.8 6.7 7.4 6.5 7.1 6.2 6.7 5.8 6.3 5.5 5.9 5.2 5.7 5.0 4.8 5.1
1.3	7.7 6.8 7.7 6.7 7.5 6.5 7.2 6.2 6.8 5.8 6.4 5.5 6.0 5.2 5.7 5.0 5.4
1.1	7.7 6.8 7.7 6.7 7.5 6.5 7.2 6.2 6.8 5.8 6.4 5.5 6.0 5.2 5.7 5.0 5.5
0.8	7.7 6.8 7.7 6.7 7.5 6.5 7.2 6.2 6.8 5.8 6.4 5.5 6.0 5.2 5.7 5.0 5.5
0.5	7.8 6.8 7.7 6.7 7.5 6.5 7.2 6.2 6.8 5.8 6.4 5.5 6.0 5.2 5.7 5.0 5.5
0.3	7.8 6.8 7.7 6.7 7.5 6.5 7.2 6.2 6.8 5.8 6.4 5.5 6.0 5.2 5.7 5.0 5.5
0.0	1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0



表3-4 球形比例計数管增幅率分布評価結果  
(陽極線を軸とする軸対象断面での增幅率分布)

表中の数字は、各位置で発生した自由電子に対する増幅率を示す。

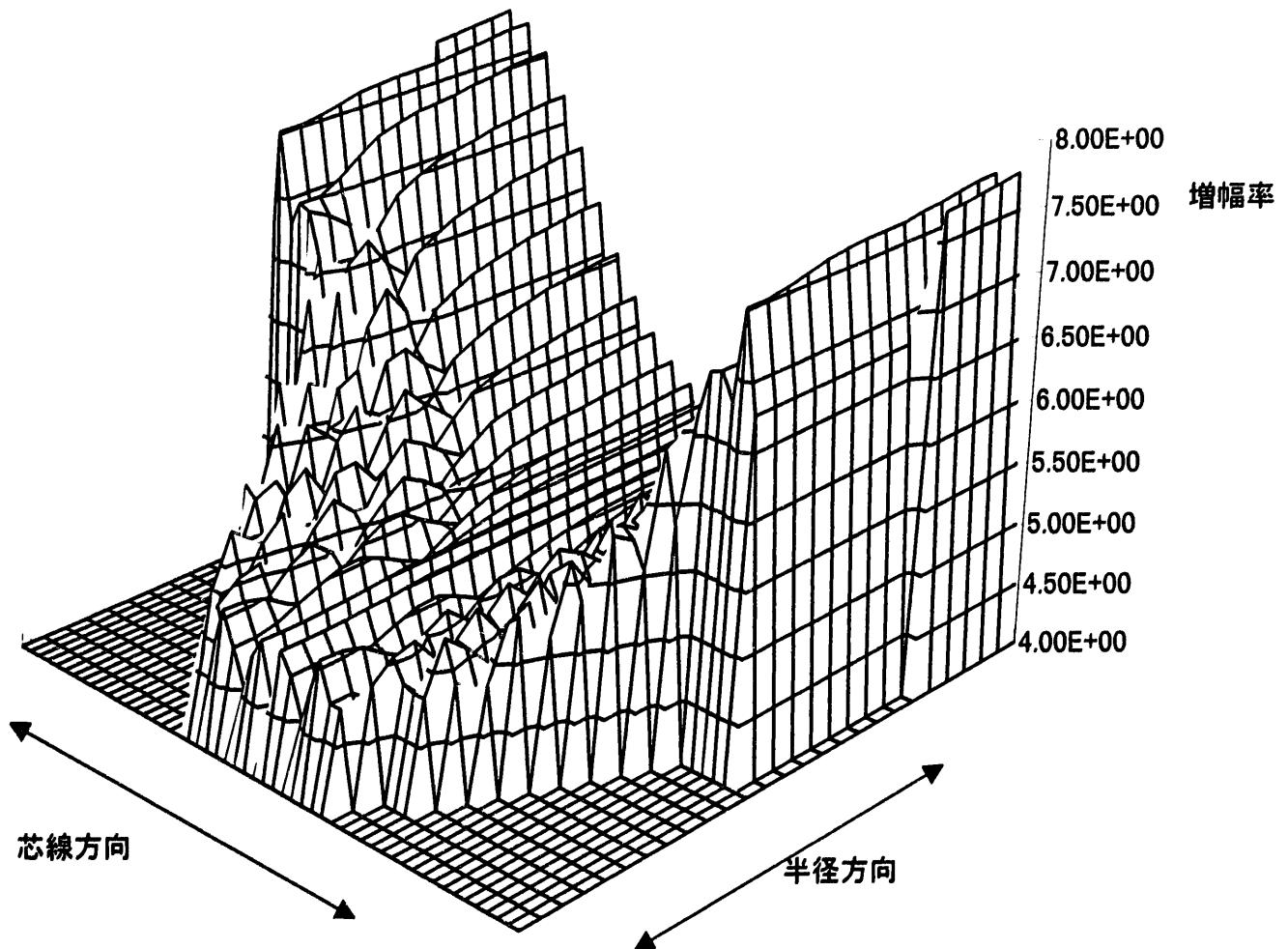


図3-10 球形比例計数管增幅率分布評価結果

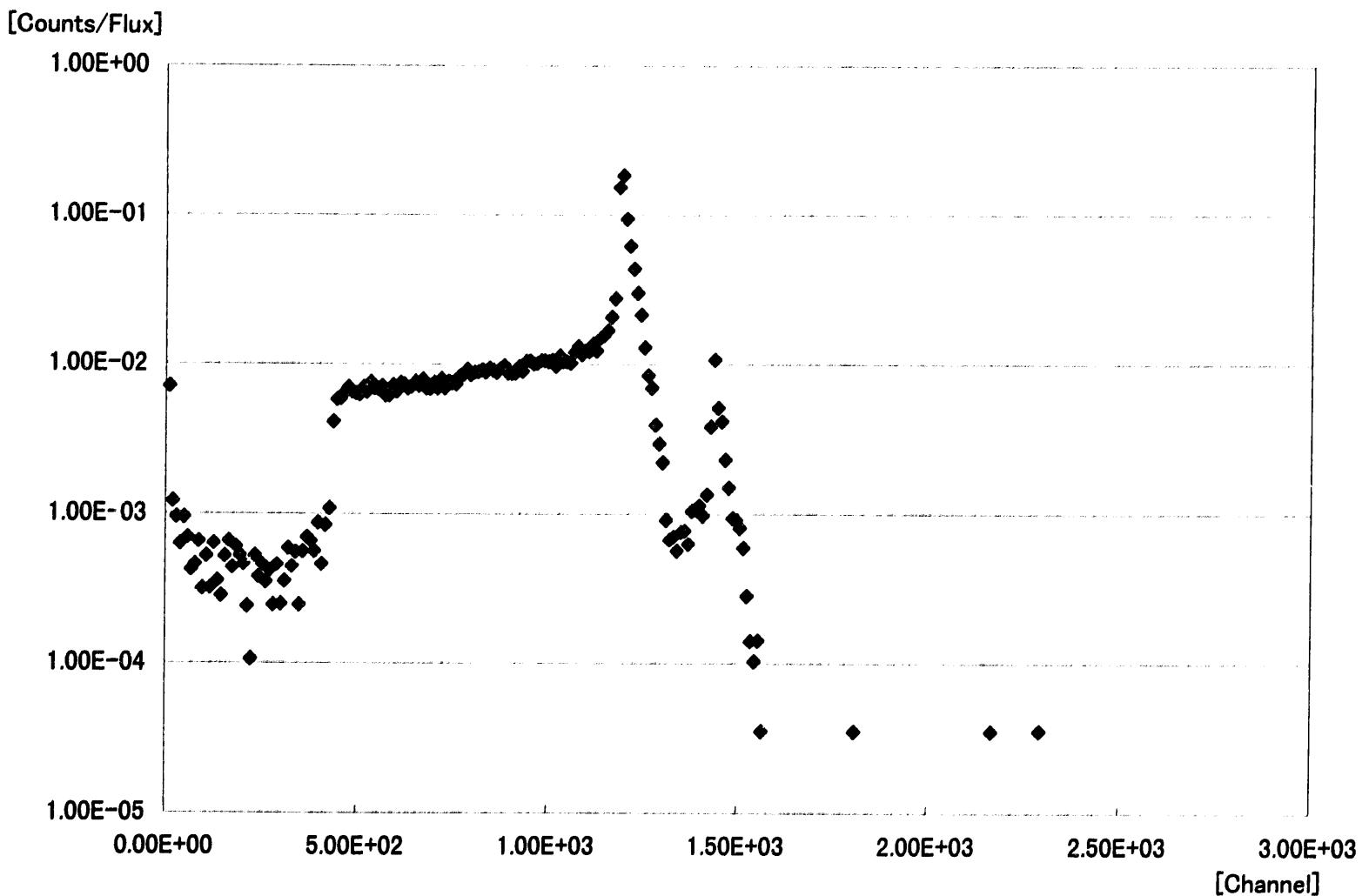


図3-11 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答計算評価結果(その3)  
[增幅率分布の影響を加味したもの]

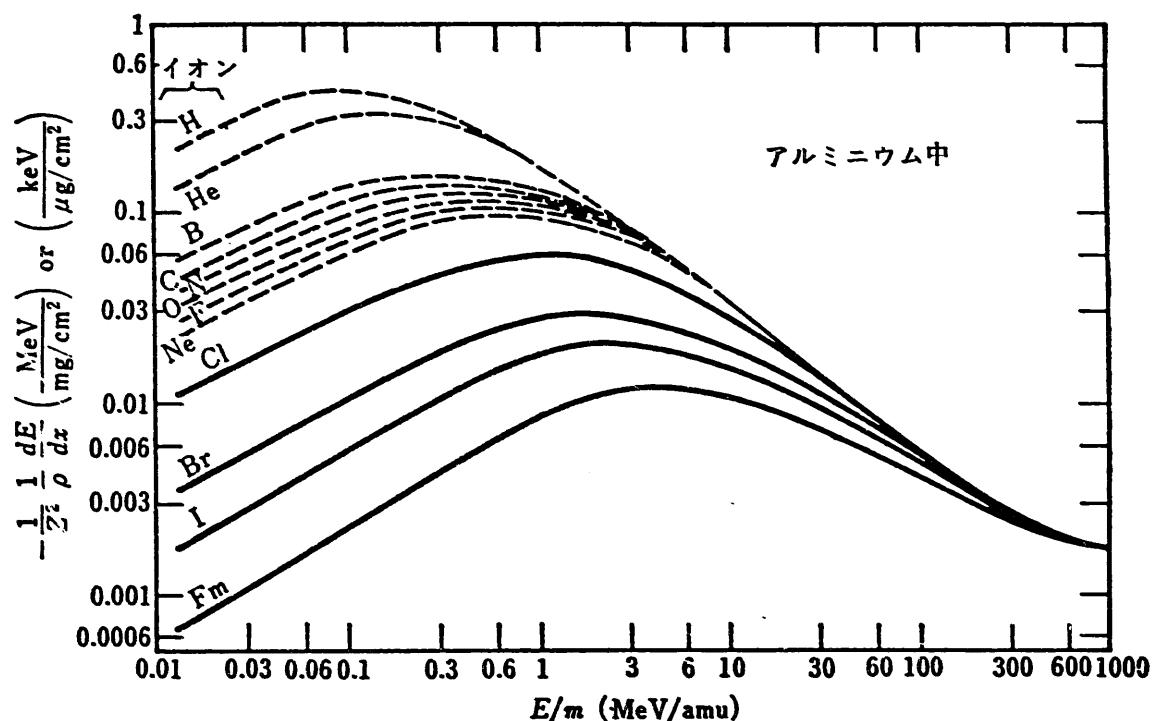


図 3-12 種々の重イオンの比エネルギー損失に関するデータ

(放射線計測ハンドブック第 2 版 図 2.11 を引用)

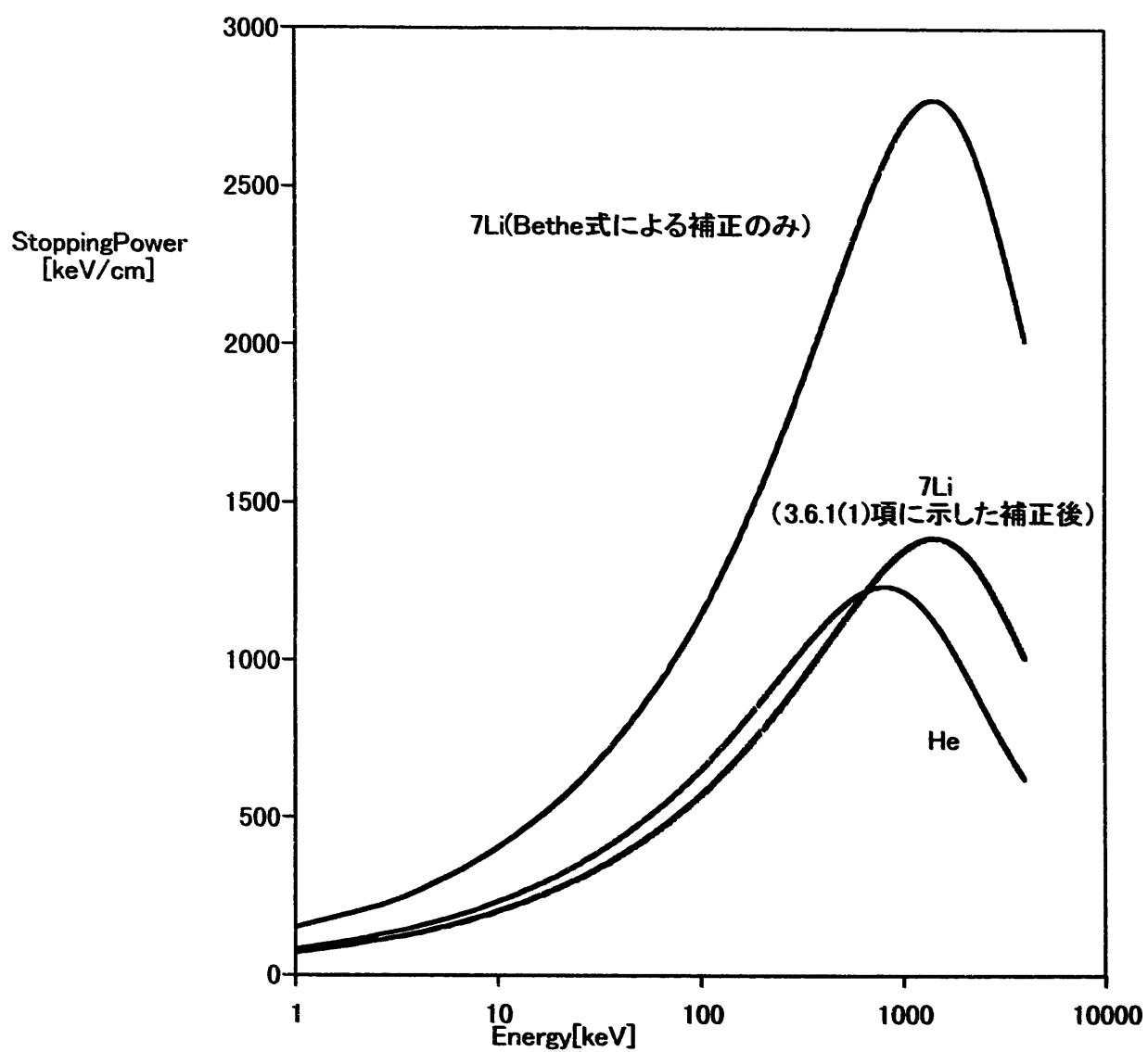


図3-13 BF3ガス中のLi粒子の阻止能の評価結果

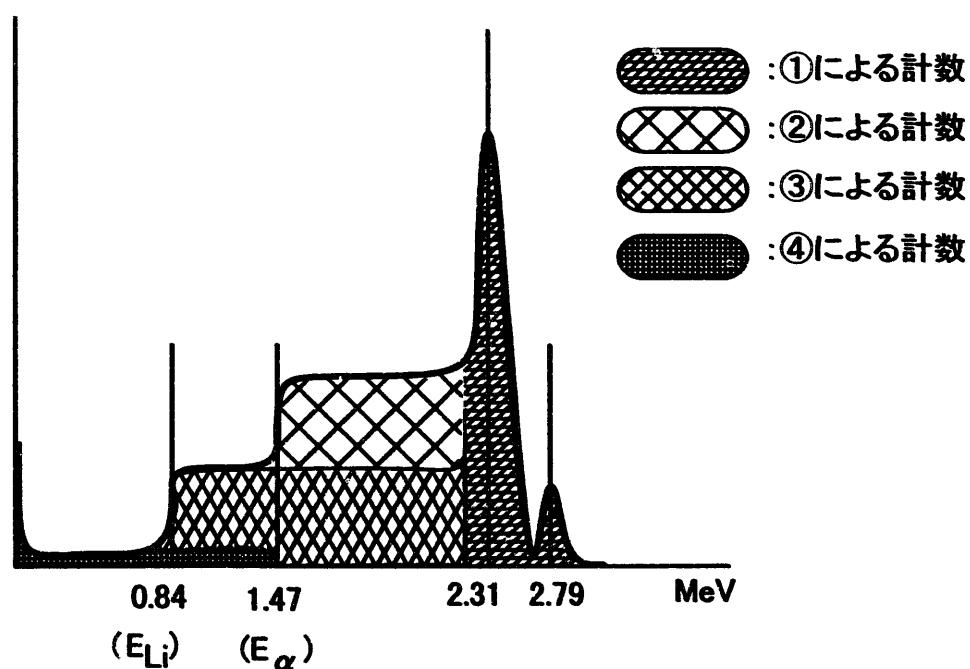
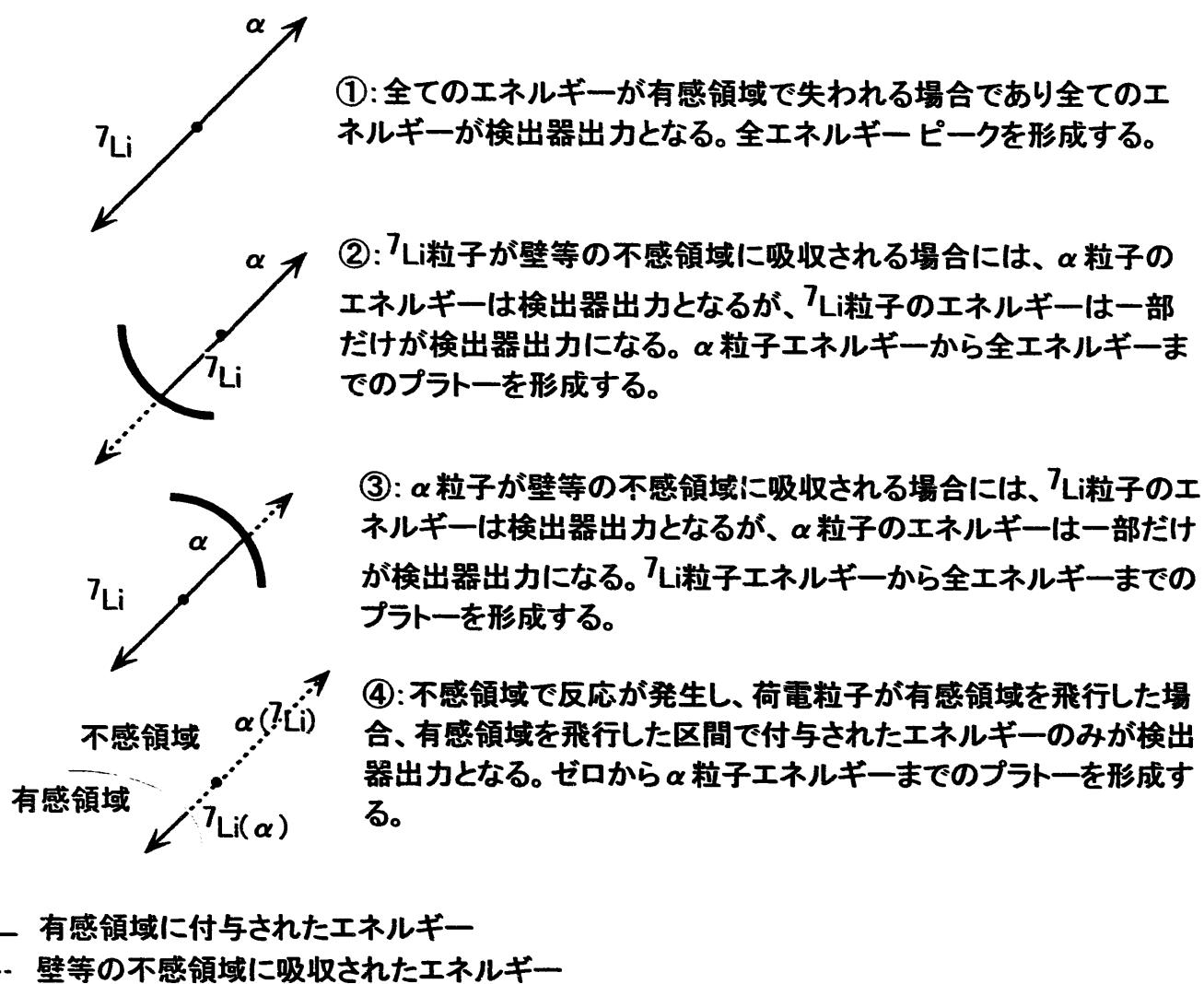


図3-14 球形 $\text{BF}_3$ 比例計数管中の荷電粒子の挙動

- 35 -

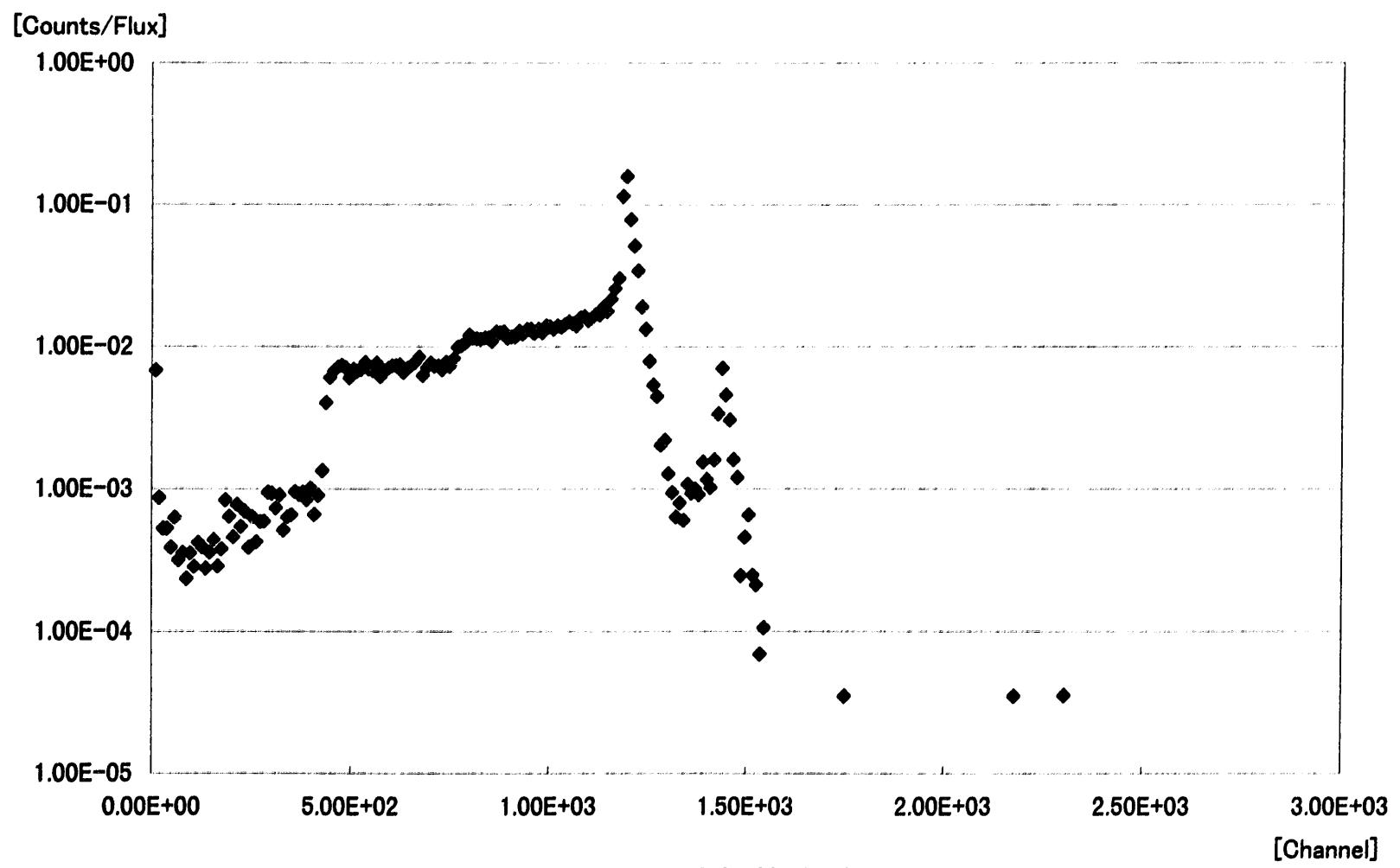


図3-15 球形BF<sub>3</sub>比例計数管応答評価計算結果(その4)  
[荷電粒子の飛程を補正]

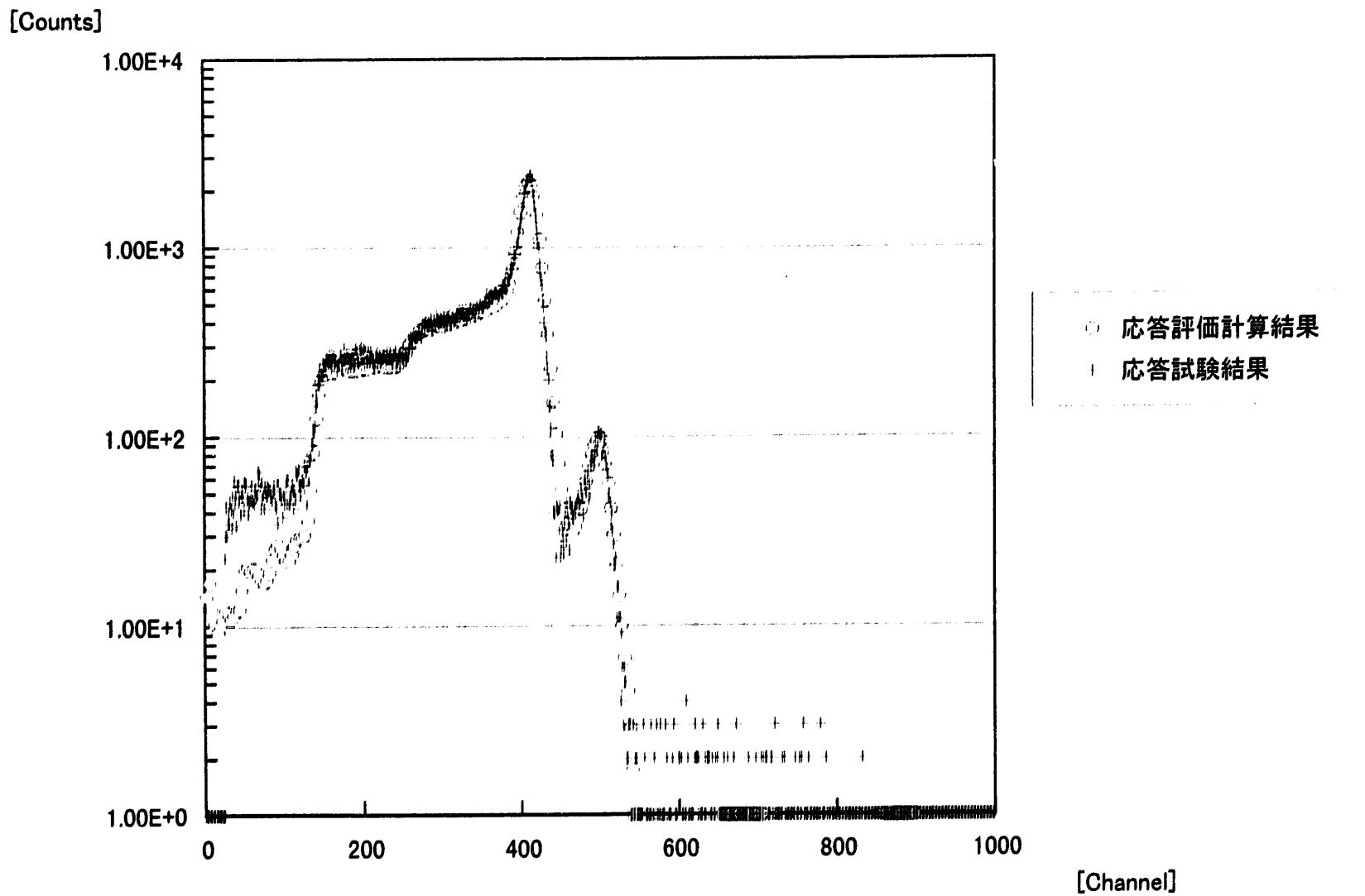


図3-16 応答評価計算結果結果と応答試験結果の比較

## 4.まとめと今後の課題

### 4.1 まとめ

従来の NRESP を、検出器形状の自由度、評価対象核種などについて拡張し、汎用型中性子検出器応答計算コード NRESP98 として整備した。

NRESP98 を用いて、球形  $\text{BF}_3$  計数管の出力の評価を行った。電界分布に基づく増幅率分布の影響、不感領域の影響、荷電粒子の飛程、統計的分散の影響などを加味し、試験結果に対して  $\pm 10\%$  以内の適切な評価が行えることが示された。

### 4.2 今後の課題

#### (1)NRESP98 の改良

今回の NRESP98 の整備において、まだ不十分な点をいくつか残している。第一に、検出器端部構造の評価である。特に、 $\text{BF}_3$  ガス領域の形状、電極の配置、フィールドチューブを含めた陽極線の処理などがまだはつきりしておらず、不感領域の評価にまだ不明瞭な部分を残している。

また、 $\text{BF}_3$  ガス中での Townsend 係数、Li 粒子の比エネルギー損失については、推定値を使っており、これらの確立が求められる。さらに、 $\text{BF}_3$  ガスの阻止能については化合物の阻止能に関する Bragg Kleeman 則を適用しているが、化合物によってはこれより 10~20%異なる<sup>8)</sup>という記述もあり、調査を行う必要があるだろう。

これらに関しては、今後も引き続き調査を行い、コードの改良を続けたい。

#### (2)NRESP98 の応用

今回は球形  $\text{BF}_3$  計数管についての評価を行ったが、この評価の応用として以下の方向が考えられる。

まず、中性子線量当量率測定に関する評価である。エリアモニタや線量当量率計について、これまで中性子輸送計算に基づいて換算係数を評価しているが、NRESP98 を用いて、測定器の出力を直接評価する形で、これまでに得られている換算係数、応答特性について検証を行いたい。また、これに基づき、ICRP90 年勧告に基づく中性子線量の見直しへの対応についても確認できるであろう。

また、 $\text{BF}_3$  計数管を用いた減速材式中性子スペクトロメータの応答の詳細評価、あるいは複合型検出器<sup>11)</sup>の設計にも応用していきたい。

## 5.謝辞

本研究を実施するに当たって、科学システム研究所（有）の杉田武志氏には、NRESP98 のプログラミングをお願いし、また有益な議論を行うことができた。ここに深く感謝いたします。

また、電子技術総合研究所の工藤勝久博士、武田直人氏とは共同研究を展開するなど、多岐にわたって貴重な議論を行うことができた。深く感謝いたします。

放射線管理課鳥居建男氏（現敦賀事務所環境安全課）には、本研究に関するたくさんの指導および助言をいただいた。また、放射線管理課の田川博氏、高嶋秀樹氏には、試験の実施にご協力いただいた。深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1)野崎達夫、他：プラスティックシンチレーションファイバーガスモニタの開発、PNC TN9410 96-262
- 2)C.Dietze and H.Klein, "NRESP4 and NEFF4: Monte Carlo Codes for the Calculation of Neutron Response Functions and Detection Efficiencies for NE213 Scintillation Detectors," PTB-ND-22(1982)
- 3)X.Yang, et al., "A Study of the Influence of Neutron Scattering due to the Wall on the Response Functions of Gas Counters Using a New Version of the NRESP Monte-Carlo Code," Bull. of Electrotechnical Laboratory, Vol.56 No.8(1992)
- 4)N.Takeda and K.Kudo, "Neutron Response Functions Improved by Taking in Consideration Measured Edge Effect of  $^3\text{He}$  Proportional Counter", IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.41 No.4(1994)
- 5)Judith F. Briemeister Ed., "MCNP4A-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M(1993)
- 6)Andersen H. H. and Ziegler J. F., "Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements, Volume3 of The Stopping and Range of Ions in Matter," Pergamon Press(1977)
- 7)Ziegler J. F., "Helium Stopping Powers and Ranges in All Elements, Volume4 of The Stopping and Range of Ions in Matter," Pergamon Press(1977)
- 8)G. F. Knoll 著、木村逸郎、阪井英次訳、「放射線計測ハンドブック（第2版）」、日刊工業新聞社（1991）
- 9)加川幸雄編、「FEM プログラム選1 電界－2次元、軸対象、3次元－」、森北出版
- 10) 大木正路著、「高電圧工学」、横書店（1982）
- 11) 橋本周、他：複合型中性子線量当量測定器の開発、PNC TN9410 95-189

## 付録 1. NRESP98 入力データの説明

NRESP98 の入力データについて以下に解説する。入力データの実例については付録 2 に示す。

なお、データ形式は一部を除きフリーフォーマット。一部のデータ形式の指定に関する表記の意味は以下のとおり。

(A10) : アルファベット 10 桁

(A8,2X) : アルファベット 8 桁、データ後に必ず空白を 2 桁入れる。

(F10.0) : 浮動小数点数値 10 桁、小数点位置自由

(F10.8) : 浮動小数点数値 10 桁、小数点以下 8 桁

(I10) : 整数值 10 桁

また、入力データ中、第一桁が \* である行はコメントとして扱う。

### 第 1 カード

ITGEOM : 検出器の形状を指定する。

-1 : 円筒形 (既指定形状)

0 : 円筒形

1 : 球形

NGAS : 検出器ガスの種類

0 : ユーザー定義

1 :  $^3\text{He} + ^4\text{He} + \text{Kr}$

2 :  $^3\text{He} + \text{Kr} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$

3 :  $^3\text{He} + ^4\text{He} + \text{Ar}$

4 :  $^3\text{He} + \text{Ar} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$

5 :  $\text{BF}_3$

NWALL : 検出器壁の材質

0 : ユーザー定義

1 : Al

2 : ステンレス

### 第 2 カード群

NGAS=0 の場合のガスの種類の設定

NGASMX : 混合ガスを構成するガスの数

GASNAM(I) : 各ガスの分子記号 (形式 A10)

PGAS(I) : 各ガスの分圧 [atm] (形式 F10.0)

NGASCT(I) : ガスを構成する元素の数 (形式 I10)

GASNUM(J,I) : ガスを構成する元素の元素記号 (形式 A8,2X)

DGASCT(J,I) : ガスを構成する元素の数 (形式 F10.0)

NGAS>0 の場合のガスの種類の設定

PHE3 :  $^3\text{He}$  の圧力

PHE4 :  $^4\text{He}$  の圧力

PKR : Kr の圧力

PAR : Ar の圧力

PH2 :  $\text{H}_2$  の圧力

PCH4 :  $\text{CH}_4$  の圧力

PBF3 :  $\text{BF}_3$  の圧力

第 3 カード群 (NGAS=5 の場合のみ入力)

NGAS=5 の場合に  $^{10}\text{B}$  の割合を設定

FB10 :  $^{10}\text{B}$  の割合

第 4 カード群

NWALL=0 の場合に検出器壁の材質の設定

NWALLX : 材質の数

NWALCT(I) : 各材質を構成する元素の種類数

DWALLR(I) : 各材質の密度 [g/cm<sup>3</sup>]

WALNUM(J,I) : 材質構成元素の元素記号 (形式 A8,2X)

PWALL(J,I) : 各元素の重量比 (形式 F10.0)

NWALL=0 の場合に検出器壁の材質の設定

A1 : SUS 中の Ni の割合

A2 : SUS 中の Cr の割合

A3 : SUS 中の Fe の割合

ROU01 : Ni の比重

ROU02 : Cr の比重

ROU03 : Fe の比重

第 5 カード

ITGEOM=0 の場合の形状の設定

IPLAN : 平面の個数

IRADU : 半径の個数

ITGEOM=1 の場合の形状の設定

ISPHCT : 球面の個数

第 6 カード

ITGEOM=0 の場合の形状の設定

PLANS(I) : 平面の位置

RADIUS(I) : 平面の半径 [cm]

ITGEOM=1 の場合の形状の設定

SPHERE(I) : 球面の半径 [cm]

第 7 カード

ITGEOM=-1 の場合の形状の設定

DG : 前面からガス部広報までの長さ [cm]

RG : 外半径 [cm]

DSZ : ガス部の長さ [cm]

RSZ : 内半径 [cm]

DL : 後方の厚さ [cm]

第 8 カード

各領域と材質の設定、ここで 1 または負の値を指定すると荷電粒子の追跡を行う。

ITGEOM=0 の場合

MET(J+(I-1)\*IRADU) : (J=1,IRADU)、(I=1,IPLAN-1)

ITGEOM=1 の場合

MET(I) : 中心からの領域順で指定

第 9 カード

EN : 線源中性子のエネルギー [MeV]

DEN : エネルギー幅 [MeV]

NTYP : 中性子エネルギー分布 (DEN>1 の場合有効)

0 : 単色エネルギー

1 : ガウス分布

2 : 矩形

4 : ファイル入力

(FILE51.DAT より、400 チャネル、形式 F16.8,F11.8)

ENMINA : 発生エネルギーの最小値 [MeV]

ENMAXA : 発生エネルギーの最大値 [MeV]

ECUT : 中性子のカットオフエネルギー [MeV]

第 10 カード

ITYSOR : 線源の形状

-1 : 既指定線源

0 : 点線源

1 : 側面の方形面線源

2 : 側面の円形面線源

第 11 カード

ITYSOR=-1 の場合

ABSTD : 線源位置 [cm] (円筒または球の中心からの位置)

(ABSTD>500 は平行ビーム)

TETA : 線源の放射角度

DIS : 平行ビームの入射位置を指定

(DIS<0 では無効)

WINDN : 平行ビームの幅 [cm]

(中心から端まで)

ITYSOR=0 の場合

XS0 : 線源の X 座標 [cm]

YS0 : 線源の Y 座標 [cm]

ZS0 : 線源の Z 座標 [cm]

U1 : 放射方向の X 方向余弦

V1 : 放射方向の Y 方向余弦

W1 : 放射方向の Z 方向余弦

(U1=V1=W1=0 では等方放射)

ITYSOR=1 の場合

XS0 : 線源の X 座標 [cm]

YS0 : 線源の Y 座標の最小 [cm]

YS1 : 線源の Y 座標的最大 [cm]

ZS0 : 線源の Z 座標の最小 [cm]

ZS1 : 線源の Z 座標的最大 [cm]

U1 : 放射方向の X 方向余弦

V1 : 放射方向の Y 方向余弦

W1 : 放射方向の Z 方向余弦

(U1=V1=W1=0 では等方放射)

ITYSOR=2 の場合

XS0 : 線源の X 座標 [cm]

YS0 : 線源の Y 座標 [cm]

ZS0 : 線源の Z 座標 [cm]

RS0 : 線源の半径 [cm]

U1 : 放射方向の X 方向余弦

V1 : 放射方向の Y 方向余弦

W1 : 放射方向の Z 方向余弦

(U1=V1=W1=0 では等方放射)

第 12 カード

NMAX : 総粒子数

NBATCH : バッチ数

LZTMAX : 計算打ち切り時間の設定

RAND : 乱数の種数

第 13 カード

LEND : 出力のレベル指定

NIX : A10000 の設定方法

1 : A10000 を入力

その他 : 内部自動設定

A10000 : 波形出力の代表ポイント指定

IHISTN : 軌跡を表示させる粒子数

IHISTS : 軌跡を表示させる最初の粒子番号

IHISTW : 軌跡を表示させる粒子の間隔

ISHWNO : 特定の反応の軌跡を保存する種類数

第 14 カード

(このカードは ISHWNO の数分必要)

ID1SW(I) : 特定の反応が起きる核種の番号

ID2SW(I) : 特定の反応の種類 (ENDFB データの MT に対応)

IRGNSW(I) : 特定の反応が起こる物質番号

第 15 カード

MZMESH : 吸収エネルギーの位置における補正係数

DDF : 検出器ガス部の前側からの距離 (不感応部)

DDB : 検出器ガス部の後方からの距離 (不感応部)

第 16 カード

(MZMESH の数分入力)

ZPLACE(I) : エネルギー吸収位置

GASZOU(I) : エネルギー吸収位置における補正係数

注) 元素記号は ZAID.DAT に示すものとする。特に熱中性子の  $S(\alpha, \beta)$  处理を行う場合には 8 桁目に ZAID.DAT に対応した記号を指定する。ZAID.DAT のデータは次ページに記す。

## ZAI.DATのデータ

H - 1	1001.50c	H - 2	1002.55c	H - 3	1003.50c
HE- 3	2003.50c	HE- 4	2004.50c	LI- 6	3006.50c
LI- 7	3007.55c	BE- 9	4009.50c	B - 10	5010.50c
B - 11	5011.56c	C	6000.50c	C - 12	6012.50c
N - 14	7014.50c	N - 15	7015.55c	O - 16	8016.50c
F - 19	9019.50c	NA- 23	11023.50c	MG	12000.50c
AL- 27	13027.50c	SI	14000.50c	P - 31	15031.50c
S - 32	16032.50c	CL	17000.50c	AR	18000.35c
K	19000.50c	CA	20000.50c	TI	22000.50c
V	23000.50c	CR	24000.50c	MN- 55	25055.50c
FE	26000.55c	CO- 59	27059.50c	NI	28000.50c
CU	29000.50c	GA	31000.50c	AS- 75	33075.35c
KR- 78	36078.50c	KR- 80	36080.50c	KR- 82	36082.50c
KR- 83	36083.50c	KR- 84	36084.50c	KR- 86	36086.50c
Y - 89	39089.35c	ZR	40000.50c	NB- 93	41093.50c
MO	42000.50c	RH-103	45103.50c	RH-117	45117.90c
PD-119	46119.90c	AG	47000.55c	AG-107	47107.50c
AG-109	47109.50c	CD	48000.50c	SN	50000.35c
SN-120	50120.35c	XE	54000.35c	CS-133	55133.50c
BA-138	56138.50c	SM-149	62149.50c	EU	63000.35c
EU-151	63151.55c	EU-152	63152.55c	EU-153	63153.55c
EU-154	63154.50c	GD	64000.35c	GD-152	64152.50c
GD-154	64154.50c	GD-155	64155.50c	GD-156	64156.50c
GD-157	64157.50c	GD-158	64158.50c	GD-160	64160.50c
HO-165	67165.55c	HF	72000.50c	TA-181	73181.50c
W	74000.55c	W -182	74182.55c	W -183	74183.55c
W -184	74184.55c	W -186	74186.55c	RE-185	75185.35c
RE-187	75187.35c	PT	78000.35c	AU-197	79197.56c
PB	82000.50c	BI-209	83209.50c	TH-232	90232.50c
PA-233	91233.50c	U -234	92234.50c	U -235	92235.50c
U -236	92236.50c	U -237	92237.50c	U -238	92238.50c
U -239	92239.35c	U -240	92240.35c	NP-237	93237.55c
PU-238	94238.50c	PU-239	94239.55c	PU-240	94240.50c
PU-241	94241.50c	PU-242	94242.50c	PU-243	94243.35c
AM-241	95241.50c	AM-242M	95242.50c	AM-243	95243.50c
CM-242	96242.50c	CM-244	96244.50c	CM-245	96245.52c
H - 1 L	lwtr.01t	H - 1 P	poly.01t	H - 1 Z	h/zr.01t
H - 1 B	benz.01t	C B	benz.01t	C - 12 B	benz.01t
H - 2 H	hwtr.01t	BE- 9 M	be.01t	BE- 9 O	beo.01t
O - 16 O	beo.01t	C G	grph.01t	C - 12 G	grph.01t
ZR	Z	zr/h.01t			

## 付録2. NRESP98入力データ例

```

* ITGEOM
 1
* NGAS NWALL
 0 0
* IF NGAS=0 THEN
* MGASMX
 1
* GASNMA(I) PGAS(I) NGASCT(I)
*FORMAT(A10,F10.0,110)
* GASNUM(J,I) DGASCT(J,I)
*FORMAT(A8,2X F10.0)
BF3      0.263      3
B - 10    0.96
B - 11    0.04
F - 19    3.0
* IF NGAS>0 THEN
* PHE3    PHE4    PKR    PAR    PH2    PCH4    PBF3
* 0.0     0.0     0.0     0.0    4.00    0.0     0.0
* IF NWALL=0 THEN
*HC + AL + PE
*NWALLX
 3
*NWALCT(I) DWALLR(I)
 1    7.87
*WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
*FORMAT(A10,F10.0)
FE      1.0000
*NWALCT(I) DWALLR(I)
 4    0.0012049
*WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
*FORMAT(A10,F10.0)
H - 1    1.00E-5
C - 12   0.0126
N - 14   0.7550
O - 16   0.2324
*NWALCT(I) DWALLR(I)
 2    0.90
*WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
*FORMAT(A10,F10.0)
H - 1 P  0.1437
C - 12   0.8563
* IF NWALL=2 THEN
*SUS
* A1      A2      A3      ROU01    ROU02    ROU03
* 0.080   0.180   0.740   8.85     7.20     7.86
* IF ITGEOM=0 THEN
*IPLAN   IRADU
* 4      2
*PLAND(I)
*0.00  0.06  20.28  20.33
*RADIUS(I)
*1.22  1.27
*(MET(J+(I-1)*IRADU),J=1,IRADU), I=1, IPPLAN-1)
* 2      2
* 1      2
* 2      2
* IF ITGEOM=1 THEN
*ISPHCT
 5
*SHERE(I)
 2.4892  2.54  3.50  13.50  100.0
*MET(I)
 1      2      3      4      0
* IF ITGEOM=-1 THEN
* DG      RG      DSZ      RSZ      DL
* 20.28  1.27  20.22  1.22  0.05
* EN      DEL      NTYP  ENMIMA  ENMAXA  ECUT
 4500    0.00    0    2200.  2600.  1.0E-8
*ITYSOR
 2
* -1 : OLD
* 0 : POINT
* 1 : X PLANE
* 2 : Z PLANE
*IF ITYSOR=-1

```

```
*ABSTD    TETA   DIS   WINDN
* 40.20   0.00  -20.0   0.20
*IF ITYSOR=0
*  XO    YO    ZO      UI    VI    WI
*  0.0    0.0  -50.0    0.0   0.0   1.0
*IF ITYSOR=1
*  XO    YO    Y1    ZO    Z1      UI    VI    WI
* -10.0  -5.0   5.0   0.0  40.0    1.0   0.0   0.0
*IF ITYSOR=2
*  XO    YO    ZO    R0      UI    VI    WI
*  0.0    0.0  -15.0  13.50    0.0   0.0   1.0
*NMAX      NBATCH  LZTMAX  RAND
16000000     100   60000  12345.
*LEND    NIX   A10000  IHISTN  IHISTS  IHISTW  ISHWNO
2      -1    716.43   100       1       1       0
*ID1SW    ID2SW  IRGNSW
*   4      2      -2
*   1     107       1
*MZMESH   DDF   DDB
0     0.0   0.0
```

## 付録3. NRESP98計算結果概要示一例

```

1<<<                                LIST OF INPUT DATA >>>
<<< * ITGEOM
<<<   1
<<< * NGAS NWALL
<<<   0   0
<<< * IF NGAS=0 THEN
<<< * MGASMX
<<<   1
<<< * GASNMA(I) PGAS(I) NGASCT(I)
<<< *FORMAT(A10,F10.0,110)
<<< * GASNUM(J,I) DGASCT(J,I)
<<< *FORMAT(A8,2X F10.0)
<<<   BF3      0.263      3
<<<   B - 10    0.96
<<<   B - 11    0.04
<<<   F - 19    3.0
<<< * IF NGAS>0 THEN
<<< * PHE3     PHE4     PKR     PAR     PH2     PCH4     PBF3
<<< * 0.0      0.0      0.0      0.0     4.00     0.0      0.0
<<< * IF NWALL=0 THEN
<<< *HC + AL + PE
<<< *NWALLX
<<<   3
<<< *NWALCT(I) DWALLR(I)
<<<   1      7.87
<<< *WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
<<< *FORMAT(A10,F10.0)
<<<   FE      1.0000
<<< *NWALCT(I) DWALLR(I)
<<<   4      0.0012049
<<< *WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
<<< *FORMAT(A10,F10.0)
<<<   H - 1      1.00E-5
<<<   C - 12     0.0126
<<<   N - 14     0.7550
<<<   O - 16     0.2324
<<< *NWALCT(I) DWALLR(I)
<<<   2      0.90
<<< *WALNUM(J,I) PWALL(J,I)
<<< *FORMAT(A10,F10.0)
<<<   H - 1 P     0.1437
<<<   C - 12     0.8563
<<< * IF NWALL=2 THEN
<<< *SUS
<<< * A1      A2      A3     ROU01     ROU02     ROU03
<<< * 0.080   0.180   0.740   8.85      7.20      7.86
<<< * IF ITGEOM=0 THEN
<<< *IPLAN   IRADU
<<< * 4       2
<<< *PLAND(I)
<<< *0.00   0.06   20.28   20.33
<<< *RADUS(I)
<<< *1.22   1.27
<<< *(MET(J+(I-1)*IRADU),J=1,IRADU),I=1,IPLAN-1)
<<< * 2       2
<<< * 1       2
<<< * 2       2
<<< * IF ITGEOM=1 THEN
<<< *ISPHCT
<<<   5
<<< *SHERE(I)
<<<   2.4892   2.54   3.50   13.50   100.0
<<< *MET(I)
<<<   1       2       3       4       0
<<< * IF ITGEOM=-1 THEN
<<< * DG      RG      DSZ      RSZ      DL
<<< * 20.28   1.27   20.22   1.22   0.05
<<< * EN      DEL     NTYP     ENMIMA   ENMAXA   ECUT
<<<   4500    0.00     0     2200.    2600.   1.0E-8
<<< *ITYSOR
<<<   2
<<< * -1 : OLD
<<< * 0 : POINT
<<< * 1 : X PLANE
<<< * 2 : Z PLANE

```

```

<<< *IF ITYSOR=-1 >>>
<<< *ABSTD TETA DIS WINDN >>>
<<< * 40.20 0.00 -20.0 0.20 >>>
<<< *IF ITYSOR=0 >>>
<<< * X0 Y0 Z0 UI VI WI >>>
<<< * 0.0 0.0 -50.0 0.0 0.0 1.0 >>>
<<< *IF ITYSOR=1 >>>
<<< * X0 Y0 Y1 Z0 Z1 UI VI WI >>>
<<< * -10.0 -5.0 5.0 0.0 40.0 1.0 0.0 0.0 >>>
<<< *IF ITYSOR=2 >>>
<<< * X0 Y0 Z0 R0 UI VI WI >>>
<<< * 0.0 0.0 -15.0 13.50 0.0 0.0 1.0 >>>
<<< *NMAX NBATCH LZTMAX RAND >>>
<<< 16000000 100 60000 12345 >>>
<<< *LEND NIX A10000 IHISTN IHISTS IHISTW ISHWN0 >>>
<<< 2 -1 716.43 100 1 1 0 >>>
<<< *ID1SW ID2SW IRGNSW >>>
<<< * 4 2 -2 >>>
<<< * 1 107 1 >>>
<<< *MZMESH DDF DDB >>>
<<< -201 0.0 0.0 >>>

```

END OF INPUT DATA

1

BEGIN \*\*\*\*\*  
TARGET GAS=USER SET

WALL=USER SET

## 1AMU DATA TABLE

NO.	NUCLIDE	MASS	AMUIN-DATA	AMU-DATA	
1	N	1	1.00866497	939.57300	
2	H	1	1.00782502	938.79059	
3	D	2	2.01410174	1876.13892	
4	T	3	3.01604939	2809.45483	
5	A	4	4.00260305	3728.43115	
6	HE	3	3.01602936	2809.43604	
7	HE	4	4.00260305	3728.43115	
8	B	8	8.02460766	7474.93457	
9	B	9	9.01332951	8395.93066	
10	C	12	12.00000000	11178.01950	
11	AL	27	26.98154070	25133.34770	
12	FE	56	55.93494030	52103.48440	
13	CR	52	51.94050980	48382.66800	
14	NI	58	57.93534850	53966.86720	
15	KR	84	83.91150670	78163.70310	
16	AR	40	39.96238330	37225.02340	
17	B	10	10.01293750	9327.06738	
18	B	11	11.00930500	10255.18550	
19	F	19	18.99840350	17697.04300	
20	FE	56	55.93494030	52103.48440	
21	H	1	1.00782502	938.79059	
22	C	12	12.00000000	11178.01950	
23	N	14	14.00307370	13043.88570	
24	O	16	15.99491500	14899.28910	
25	H	1	1.00782502	938.79059	
26	C	12	12.00000000	11178.01950	
STOP PROTON	:B	2.474 2.815	1206.0 1060.0 0.028550	0.0025490 13450.0 -2.4450 1.28	
30	-0.22050	0.015600 -0.0003930			
STOP ALPHA	:B	3.691 0.413	18480.0 50720.0 0.0090000	0.0025490 13450.0 -2.4450 1.28	
STOP PROTON	:B	2.474 2.815	1206.0 1060.0 0.028550	0.0025490 13450.0 -2.4450 1.28	
30	-0.22050	0.015600 -0.0003930			
STOP ALPHA	:B	3.691 0.413	18480.0 50720.0 0.0090000	0.0045890 8517.0 -5.5710 2.44	
STOP PROTON	:F	2.085 2.352	2157.0 2634.0 0.018160	0.0045890 8517.0 -5.5710 2.44	
90	-0.37810	0.024830 -0.0005919			
STOP ALPHA	:F	2.616 0.471	41200.0 28070.0 0.0024580	0.0132600 3650.0 -9.8090 3.76	
STOP PROTON	:FE	3.519 3.963	6065.0 1243.0 0.007782	0.0132600 3650.0 -9.8090 3.76	
30	-0.51640	0.030500 -0.0006600			
STOP ALPHA	:FE	5.013 0.471	85580.0 16550.0 0.0032110	0.0005099 54360.0 -5.0520 2.04	
STOP PROTON	:H	1.262 1.450	242.612000.0 0.115900	0.0005099 54360.0 -5.0520 2.04	
90	-0.30440	0.019660 -0.0004659			
STOP ALPHA	:H	0.390 0.630	4170.0 85550.0 0.0195500	0.0030590 13220.0 -4.3800 2.04	
STOP PROTON	:C	2.631 2.989	1445.0 957.2 0.028190	0.0030590 13220.0 -4.3800 2.04	
40	-0.32830	0.022210 -0.0005417			
STOP ALPHA	:C	4.232 0.388	22990.0 35000.0 0.0079930	0.0035690 11790.0 -5.0540 2.32	
STOP PROTON	:N	2.954 3.350	1683.0 1900.0 0.025130	0.0035690 11790.0 -5.0540 2.32	
50	-0.37130	0.025060 -0.0006109			
STOP ALPHA	:N	2.000 0.548	29820.0 18110.0 0.0043700		

STOP PROTON :0 2.652 3.000 1920.0 2000.0 0.022300 0.0040790 10460.0 -6.7340 3.01  
 90 -0.47480 0.031710 -0.0007669  
 STOP ALPHA :0 2.717 0.486 32880.0 25880.0 0.0043360 0.0005099 54360.0 -5.0520 2.04  
 STOP PROTON :H 1.262 1.450 242.612000.0 0.115900  
 90 -0.30440 0.019660 -0.0004659  
 STOP ALPHA :H 0.390 0.630 4170.0 85550.0 0.0195500 0.0030590 13220.0 -4.3800 2.04  
 40 -0.32830 0.022210 -0.0005417  
 STOP ALPHA :C 4.232 0.388 22990.0 35000.0 0.0079930  
 BEGIN TO INPUT C. S. AND A. D. OF F HE3 HE4 AND KR83  
 FINISH 1  
 BEGIN TO INPUT C.S. OF H C AND AL  
 FINISH 2  
 BEGIN TO INPUT C.S. AND A. D. OF AL OR NI CR AND FE  
 0.99901 0.88526  
 FINISH 3  
 FINISH INPUTTING ALL DATA

NEUTRON ENERGY 4.500E+03 KEV

MONOENERGETIC NEUTRON

NO.	RHO (G/CC)	NUC-KIND	NO.	NUC-NAME	WEIGHT%	NUMBERS
1	7.870E+00	1	1	FE	1.000E+00	8.473E-02
2	1.205E-03	4	1	H - 1	1.000E-05	7.200E-09
			2	C - 12	1.260E-02	7.619E-07
			3	N - 14	7.550E-01	3.912E-05
			4	O - 16	2.324E-01	1.054E-05
3	9.000E-01	2	1	H - 1 P	1.437E-01	7.728E-02
			2	C - 12	8.563E-01	3.868E-02
NO.	GAS-NAME	ATM	NO.	NUC-NAME	WEIGHT	NUC-COUNT
1	BF3	2.630E-01	1	BF3	3	
	1 B - 10	9.600E-01	2	B - 11	4.000E-02	2.826E-07
	3 F - 19	3.000E+00	3	F - 19	2.120E-05	

CHECK OF RANDUM NUMBER :RANMAR:

6 3 11 3 0 4 0  
 13 8 15 11 11 14 0  
 6 15 0 2 3 11 0  
 5 14 2 14 4 8 0  
 7 15 7 10 12 2 0

FINAL NZYKL	:	16000000
THE DETECTION EFFICIENCY	:	7.22386E-02
THE SOURCE DETECTION EFFICIENCY	:	1.40617E+00
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	ELASTIC REACTION	:
42		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	NON-ELASTIC REACTION	:
0		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	ABSORPTION	:
089		5
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	(N, F) REACTION	:
1		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	(N, D) REACTION	:
0		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 10	(N, ALPHA) REACTION	:
418		40
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11	ELASTIC REACTION	:
8		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11	(N, 2N) REACTION	:
0		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11	(N, N+A) REACTION	:
0		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11	(N, N+P) REACTION	:
0		
<< DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11	NON-ELASTIC REACTION	:

```

0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11 ABSORPTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11 (N, P) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11 (N, T) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF B - 11 (N, ALPHA) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 ELASTIC REACTION   :
276 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, 2N) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, N+A) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, N+P) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 NON-ELASTIC REACTION   :
26 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 ABSORPTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, P) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, D) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, T) REACTION   :
0 << DETECTER REGION >> TOTAL REACTION RATE OF F - 19 (N, ALPHA) REACTION   :
2 REGION NO. = 1 FIRST REACTION RATE OF TOTAL TOTAL REACTION   : 12
REGION NO. = 2 FIRST REACTION RATE OF TOTAL TOTAL REACTION   : 4139
REGION NO. = 3 FIRST REACTION RATE OF TOTAL TOTAL REACTION   : 23
REGION NO. = 4 FIRST REACTION RATE OF TOTAL TOTAL REACTION   : 15995826
CPU TIME:      110.429 MIN.

```

## 付録4. NRESP98計算結果スペクトルデータ例

SPHERE					
2. 489E+00 2. 540E+00 3. 500E+00 1. 350E+01 1. 000E+02					
EN = 4. 50000E+03 KEV					
ENERGY (KEV)	CLIGHT	MEAN	S. D.		
	16000000				
1 9. 720000E+00	6. 761146E-03	6. 761146E-03	5. 281268E-03		
2 1. 944000E+01	8. 645012E-04	8. 645015E-04	1. 805756E-03		
3 2. 916000E+01	5. 262753E-04	5. 262753E-04	1. 259420E-03		
4 3. 888000E+01	5. 264412E-04	5. 264413E-04	1. 259762E-03		
5 4. 860000E+01	3. 841651E-04	3. 841650E-04	1. 098851E-03		
(中略)					
795 7. 727400E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
796 7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
797 7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
798 7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
799 7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
800 7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00		
ENERGY (KEV)	B - 10 ELASTIC ACTION	B - 10 NON-ELASTI C REACTION	B - 10 ABSORPTION	B - 10 (N, P) REAC TION	
	42	0	5089	1	
1 9. 720000E+00	6. 523291E-04	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
2 1. 944000E+01	3. 533972E-05	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
3 2. 916000E+01	1. 061481E-04	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
4 3. 888000E+01	3. 510100E-05	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
5 4. 860000E+01	3. 530014E-05	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
(中略)					
796 7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
797 7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
798 7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
799 7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
800 7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
ENERGY (KEV)	B - 10 (N, D) REAC TION	B - 10 (N, ALPHA) REACTION	B - 11 ELASTIC RE ACTION	B - 11 (N, 2N) REA CTION	
	0	40418	8	0	
1 9. 720000E+00	0. 000000E+00	1. 018067E-03	1. 060506E-04	0. 000000E+00	
2 1. 944000E+01	0. 000000E+00	5. 238959E-04	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
3 2. 916000E+01	0. 000000E+00	2. 786416E-04	3. 508616E-05	0. 000000E+00	
4 3. 888000E+01	0. 000000E+00	2. 452688E-04	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
5 4. 860000E+01	0. 000000E+00	1. 409279E-04	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
(中略)					
796 7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
797 7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
798 7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
799 7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
800 7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
ENERGY (KEV)	B - 11 (N, N+A) RE ACTION	B - 11 (N, N+P) RE ACTION	B - 11 NON-ELASTI C REACTION	B - 11 ABSORPTION	
	0	0	0	0	
1 9. 720000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
2 1. 944000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
3 2. 916000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
4 3. 888000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
5 4. 860000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
(中略)					
796 7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
797 7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
798 7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
799 7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
800 7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	
ENERGY (KEV)	B - 11 (N, P) REAC TION	B - 11 (N, T) REAC TION	B - 11 (N, ALPHA) REACTION	F - 19 ELASTIC RE ACTION	
	0	0	0	276	
1 9. 720000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	5. 411894E-03	
2 1. 944000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	3. 007883E-04	
3 2. 916000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	1. 063993E-04	
4 3. 888000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	1. 048166E-04	
5 4. 860000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	2. 079370E-04	

(中略)

796	7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
797	7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
798	7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
799	7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
800	7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00

	ENERGY (KEV)	F - 19 (N, 2N) REACTION	F - 19 (N, N+A) ACTION	F - 19 (N, N+P) REACTION	F - 19 NON-ELASTIC REACTION
		0	0	0	26
1	9. 720000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	1. 333861E-04
2	1. 944000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	3. 535352E-05
3	2. 916000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
4	3. 888000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	1. 412549E-04
5	4. 860000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00

(中略)

796	7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
797	7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
798	7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
799	7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
800	7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00

	ENERGY (KEV)	F - 19 ABSORPTION	F - 19 (N, P) REACTION	F - 19 (N, D) REACTION	F - 19 (N, T) REACTION
		0	0	0	0
1	9. 720000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2	1. 944000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3	2. 916000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
4	3. 888000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
5	4. 860000E+01	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00

(中略)

796	7. 737120E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
797	7. 746840E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
798	7. 756560E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
799	7. 766280E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00
800	7. 776000E+03	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00	0. 000000E+00

	ENERGY (KEV)	F - 19 (N, ALPHA) REACTION
		2
1	9. 720000E+00	0. 000000E+00
2	1. 944000E+01	0. 000000E+00
3	2. 916000E+01	0. 000000E+00
4	3. 888000E+01	0. 000000E+00
5	4. 860000E+01	0. 000000E+00

(中略)

796	7. 737120E+03	0. 000000E+00
797	7. 746840E+03	0. 000000E+00
798	7. 756560E+03	0. 000000E+00
799	7. 766280E+03	0. 000000E+00
800	7. 776000E+03	0. 000000E+00