

新型転換炉原型炉

遮蔽設計用コードQAD-FUGEN

— ユーザーズ・マニュアル —

昭和59年5月



動力炉・核燃料開発事業団
新型転換炉開発本部

新型転換炉原型炉

遮蔽設計用コードQAD-FUGEN — ユーザーズ・マニュアル —

目 次

1. 計算コードの概要	1
2. QAD-FUGENの特長	4
2.1 計算コードQAD-FUGENの特長	4
2.2 計算コード内の使用定数と検討	4
2.3 QAD-FUGENのブロック・チャート	7
3. QAD-FUGENの入力データのフォーマット	10
3.1 ディジタイザによる入力データのフォーマット	11
3.2 カードによる入力データのフォーマット	20
4. サンプル解析	32
4.1 サンプル問題	32
4.2 サンプル入力	32
4.3 解析結果	32

1. 計算コードの概要

原子炉施設内の装置、配管は複雑でかつその数も多く、1線源ごとに評価点の線量率を計算し、積算する方法は以下に示す欠点があり実用的ではない。

- (イ) 入力データを作成する作業に多くの時間が費やされる。
- (ロ) 評価点の位置を移動させるとその度に入力データを作り直す必要がある。
- (ハ) 配管・機器相互の遮へい効果を計算することは複雑な体系では困難である。

そこで、多数の線源や遮へい体の形状と3次元座標を自動座標読取機（ディジタイザ）等で収集し、さらに評価点および線源強度等の評価に必要なデータを入力すれば評価点における線量率が算出できる、遮へい計算コードの開発を行った。

この目的で、単一線源からの被曝線量を算出する諸コードの内、原型炉「ふげん」に利用可能で、応用範囲の広い遮へい計算コードQAD-GEOM（線源および、遮へい体形状が二次曲面で入力可能）の入力部分を改良して多数線源の入力および相互遮へい効果が計算できるコードQAD-FUGENを開発した。

次に本コードの原理を述べる。遮へい計算コードQAD-FUGENはPoint-Kernel法に基づき、評価点における線量率は次式で計算される。

$$D(r) = K \int_V \frac{S(r') \cdot B(\mu |r-r'|, E) \cdot \exp(-\mu |r-r'|)}{4\pi |r-r'|^2} dV \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 r : 計算点の位置

r' : 容積V内の線源の位置

K : flux の dose rateへの換算係数

$S(r')$: 線源 dV の代表点 r' における線源強度

$B(\mu |r-r'|, E)$: ビルドアップ係数

$D(r)$: 計算点 r での線量率 (mrem/hr)

さらにビルドアップ係数 $B(\mu |r-r'|, E)$ を Taylor 展開すると

$$D_{\Delta V}(r_j) = K_j \cdot \frac{\Delta V}{4\pi R^2} \cdot G_j \cdot [\{B_{3j} \cdot A_{gj} + B_{2j}\} \cdot A_{gj} + B_{1j}\} \cdot A_{gj} + B_{0j}] \cdot e^{-A_{gj}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

- ここで $D_{\Delta V}(\mathbf{r})_j$: エネルギ E_j の線源 ΔV による計算点 \mathbf{r} での線量率 (mrem/hr)
- K_j : エネルギ E_j の flux の dose rate への換算係数
- R : 線源 ΔV の代表点と計算点 \mathbf{r} との距離 (cm)
- ΔV : 微少線源の体積 (cm^3)
- G_j : エネルギ E_j の単体体積当たりの photon 数 (n/cm^3)
- A_{gj} : \mathbf{r} と \mathbf{r}' の等価距離 (-)
- B_{ij} : ビルドアップ係数を 3 次式に Taylor 展開した時の係数

\mathbf{r} と \mathbf{r}' の等価距離 A_{gj} は次式で示される。

$$A_{gj} = \sum_{m=1}^M \left[\mu_{mj} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^K (r_{mk} \cdot \sigma_m) \right\} \right] \quad \dots \quad (3)$$

- ここで
- j : エネルギ群番号
 - m : 物質番号 $1 \leq m \leq M$
 - k : 各層の番号 $1 \leq k \leq K$
 - σ_m : 物質の密度 (g/cm^3)
 - μ_{mj} : 減衰係数 (cm^2/g)
 - r_{mk} : 各層間の距離 (cm)

QAD-FUGEN では計算の簡略化のために、 γ 線の通過路を Zone, Block, および Sector に分けて取扱う。以下にその具体例を挙げて説明する。

図 1 に線源となる配管とコンクリート遮へい体と評価点 P の配置例を示す。同図において配管 B はコンクリート壁に平行で、配管 A は点 Q で配管 B と直交しているものとする。配管 A, B の屈折部は図 2 に示すように、配管の肉厚と同じ材質の円板で両端面が区切られた二円筒でモデル化する。

配管 A を Zone とし、配管内を Block 1 (鉄), Block 2 (鉄と水), Block 3 (鉄) として入力する。さらに組成を細分する必要がある場合には Sector を用いる。なお、壁材料はコンクリート (比重: 2.2) で Zone 4, Block 1 として指定する。Zone 以外の空間はすべて空気とする。

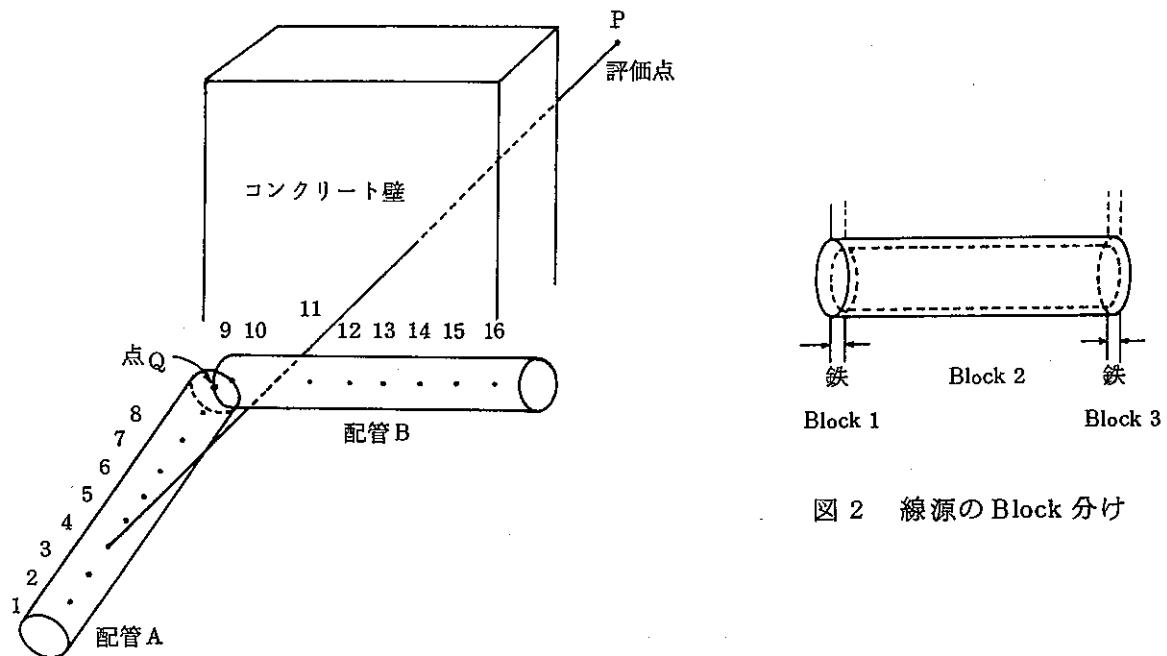


図 1 線源となる配管 (A, B) と
遮へい壁及び評価点の配置図

図 2 線源の Block 分け

図 1 にはメッシュ点 3 から評価点 P に向うγ線の経路を示した。図 3 にはその平面図を示す。ここで r_i は各領域内のγ線の通過距離である。

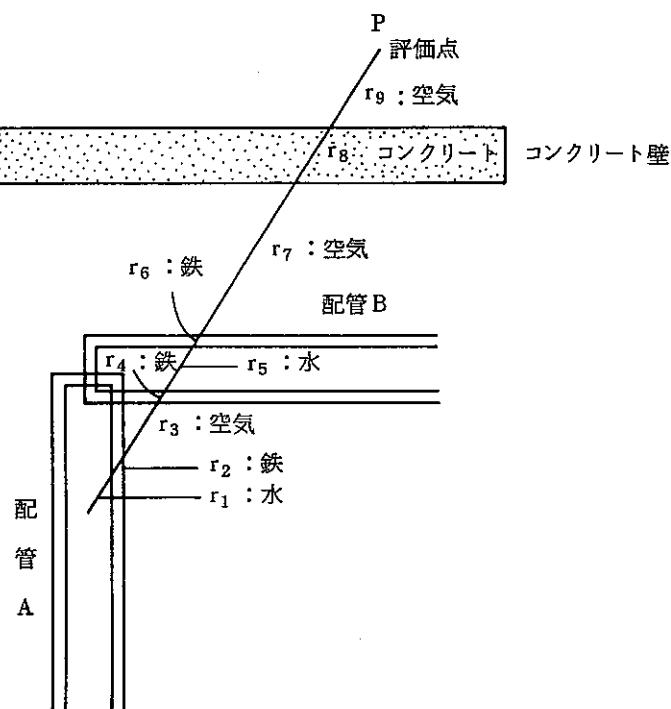


図 3 線源から評価点 P までの媒体と経路

2. QAD-FUGENの特長

2.1 計算コードQAD-FUGENの特長

本研究では当初、T. Rockwell ⅢのReactor Shielding Design Manual のF関数に基づく遮へい計算法を用い、機器・配管類の相互遮へいは評価点への投影面積による線量率を、低減により計算する方針であったが、多数線源からの線量率計算には、この方法は繁雑で応用できないことが分ったので線源を細分してPoint-Kernel法により計算するコードQAD-GEOMを改良して、原型炉「ふげん」の遮へい計算用コードにすることとした。

原子炉施設では、配管・機器類の幾何学的形状等の入力データが多数でかつ複雑であるので、次に示す諸点に改良を加えて計算機の記憶容量と計算時間の節約を計り、入出力データの再検討の合理化を計った。以下にその要点を示す。

- 1) 線源は円筒型とし、直交座標(X, Y, Z)に平行に配置するものとする。直交座標に対し、斜めに配置された配管は、直交座標に平行な配管で近似した。
- 2) 図面の寸法入力にはディジタイザを用い、入力作業を半自動化した。
- 3) Zoneの取扱いを改良した。評価対象とする空間は、鉄、水、鉛およびコンクリートで、その他は空間である。また基本となったQAD-GEOMコードは凸空間のみの集合であり凹空間は表現されないので、遮へい計算上重要でない空気を含めて空間を表現すると多数のZoneが必要になり、データ量が膨大になり計算機の記憶容量を超過する。
そこで、配管、タンクおよび壁を1つのZoneとして、残りの空間を空気とすることにより、データ量を少なくし、計算機の記憶容量の節約および計算時間の節約を計った。
- 4) 入力データとしての配管、タンク類の配置および形状を平面図(あるいは鳥瞰図)として出力できるプログラムを作成し、データ読み取り上の再検討を容易にした。

2.2 計算コード内の使用定数と検討

1) 吸収係数

吸収係数はQAD-GEOMに内蔵された元素ごとの値および混合物、化合物の場合は元素の種類とその組成より算出した値を使用した。

コンクリートの元素組成はQAD-GEOMに内蔵された組成とし、原型炉「ふげん」に用いられたコンクリートの密度 2.2 g/cm^3 に換算して使用した。吸収については各メッシュごとに r 線の通過距離を算出し、各物質ごとの吸収係数を乗じて計算する。

2) ビルドアップ係数

γ 線が 2 種類以上の物質層を通過する場合には、ビルドアップ係数として、「吸収上の等価距離 b_1^* 」がすべて鉄であるとして計算した。これは QAD-FUGEN の母体となつた QAD-GEOM がビルドアップ係数については 1 種類の物質についてのみ計算する式となっているためである。

3) メッシュ数について

配管は直径 1 インチ以上のものを計算対象とし、長さは 10cm ごとに分割した。タンク、筒類については円柱座標 (R, φ, Z) で表示し、分割メッシュ数は (10, 10, 20) を主体とした。

4) 計算コードの妥当性

遙へい計算コード QAD-FUGEN の妥当性を確認するため、先行コードとの対比及び実測値との対比を試みた。

4)-a QAD-GEOM との比較

QAD-FUGEN と、その母体となった QAD-GEOM に、線源及び幾何学的形状等のデータを入力し、相互の計算結果を比較した。その結果、両者の値は ± 0.5 % 以内の誤差範囲で良く一致した。

4)-b ISOSHLD Code との対比

QAD-FUGEN と同じ Point-Kernel 法をもちいた他コードとして ISOSHLD コードを選び、QAD-FUGEN の結果と対比したが、その結果は約 4 % 以内の誤差で一致している。しかし線源の末端では誤差が増大している。

4)-c 実測値との対比

イ) 線状線源

^{60}Co の標準線源（線状線源）からの線量率の実測値と QAD-FUGEN による計算値を対比すると 2 % の誤差範囲で一致することを確かめた。

* 通常、光学的距離 (optical distance) あるいは平均自由行程の数 (number of mean free path) と呼ばれているが、ここでは等価距離と名付けた。

$$b_1 = \sum_i \mu_i t_i, \quad \text{ここで}$$

μ_i : i 番目の物質の質量吸収係数 (cm^2/g)

t_i : i 番目の物質の厚さ ($t_i = \rho \cdot t$) (g/cm^2)

□) 体積線源

^{60}Co 水溶液を含む円筒線源からのガンマ線強度の実測値と QAD-FUGEN による計算値を対比した結果、線源からの距離による減衰は約 10~20 % の範囲で一致していた。

5) 入出力方法の改良

a. 入力データ

線源強度あるいは各配管、遮へい壁等の位置、寸法は入力データとして出力され、かつ、プロッタを使えば平面図あるいは鳥瞰図として出力できる。

b. 評価点ごとの線量率（ビルドアップ含、不含の数値）および平均エネルギー群別の、各機器ごとの線量率の寄与が出力できるので主要線源が検討できる。

2.3 QAD-FUGENのブロック・チャート

QAD-FUGENのブロック・チャートを以下に示す。

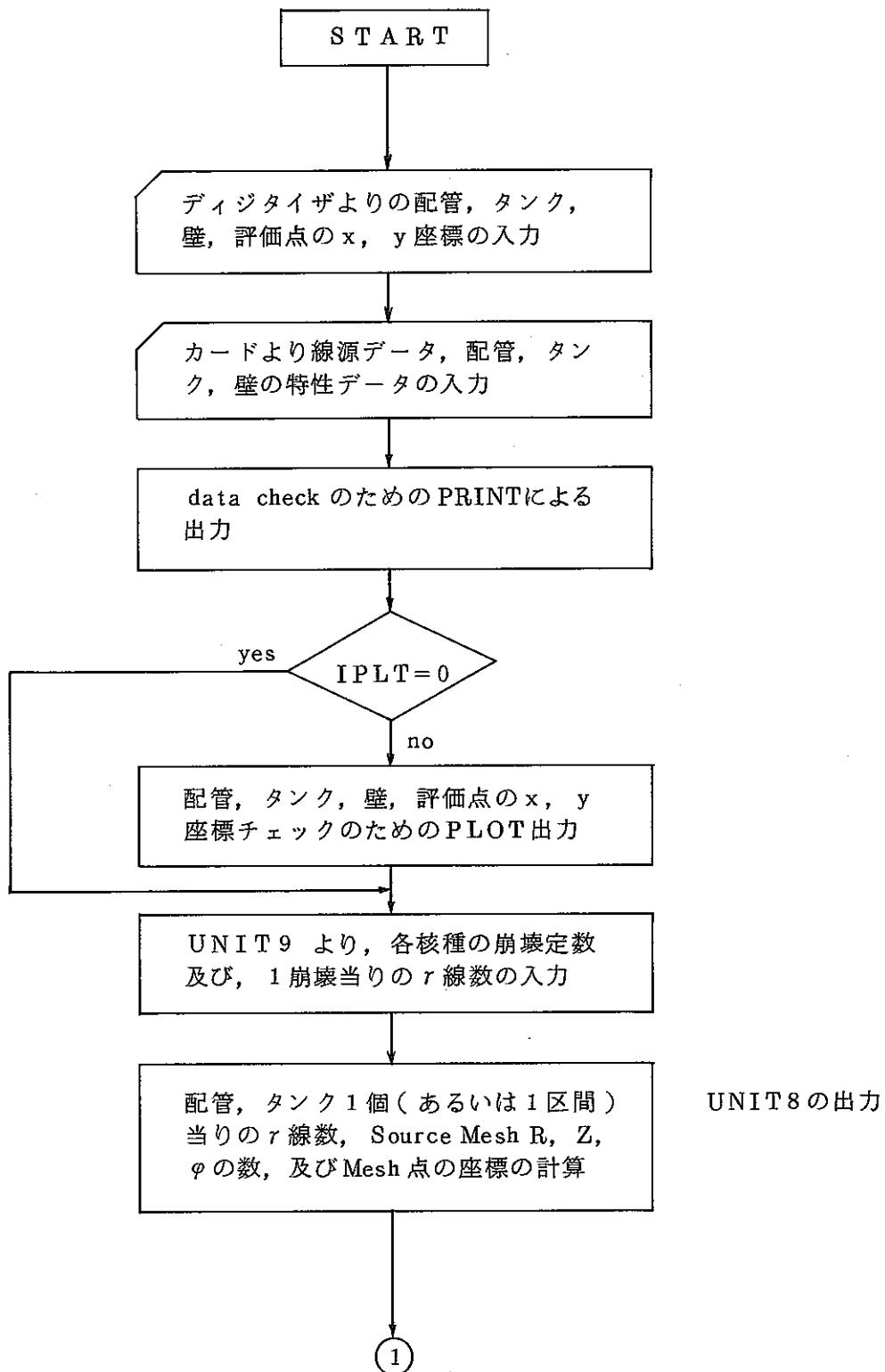


図 4 QAD-FUGEN コードのブロック・チャート

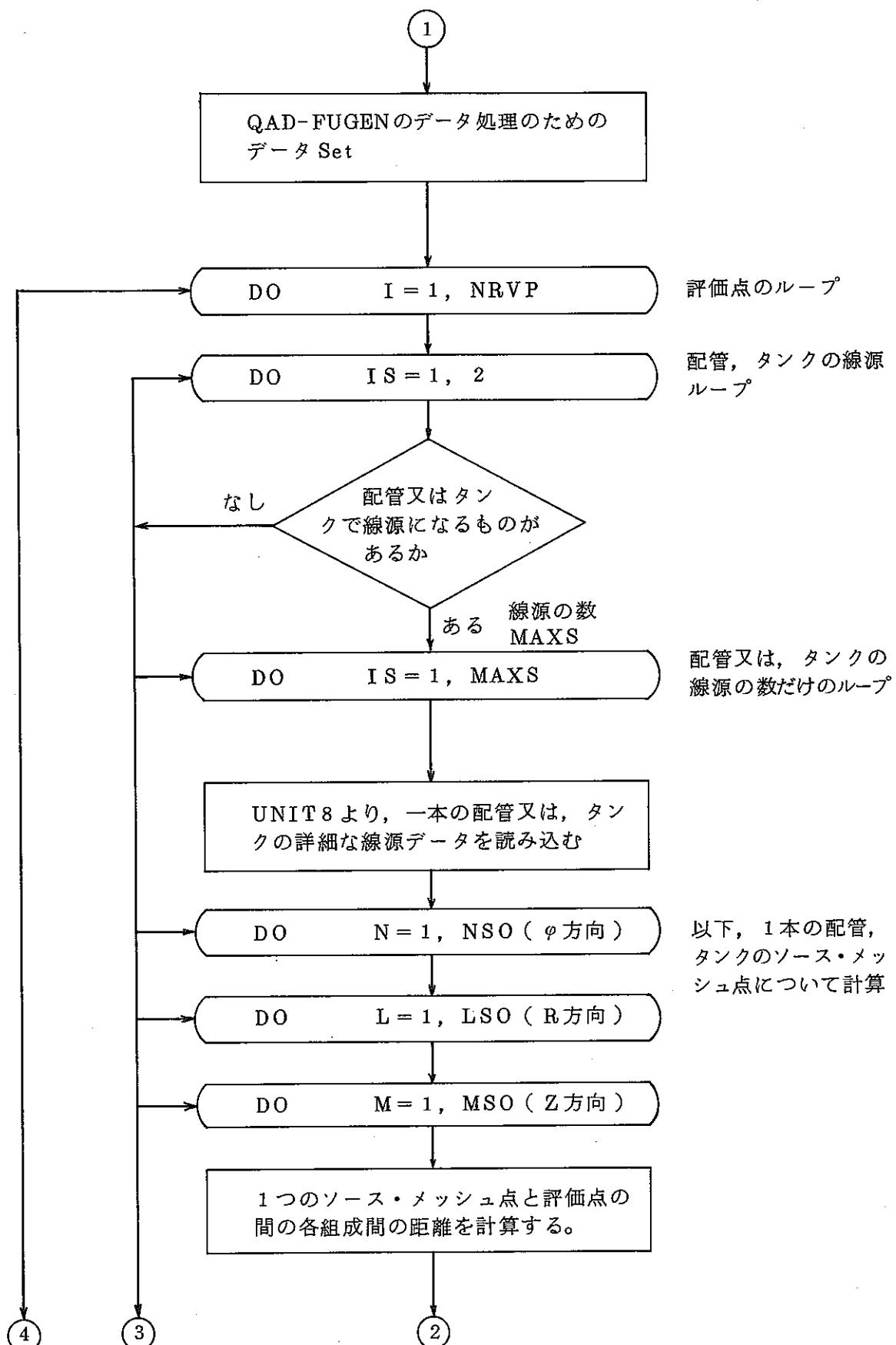


図4 QAD-FUGEN コードのブロック・チャート（つづき）

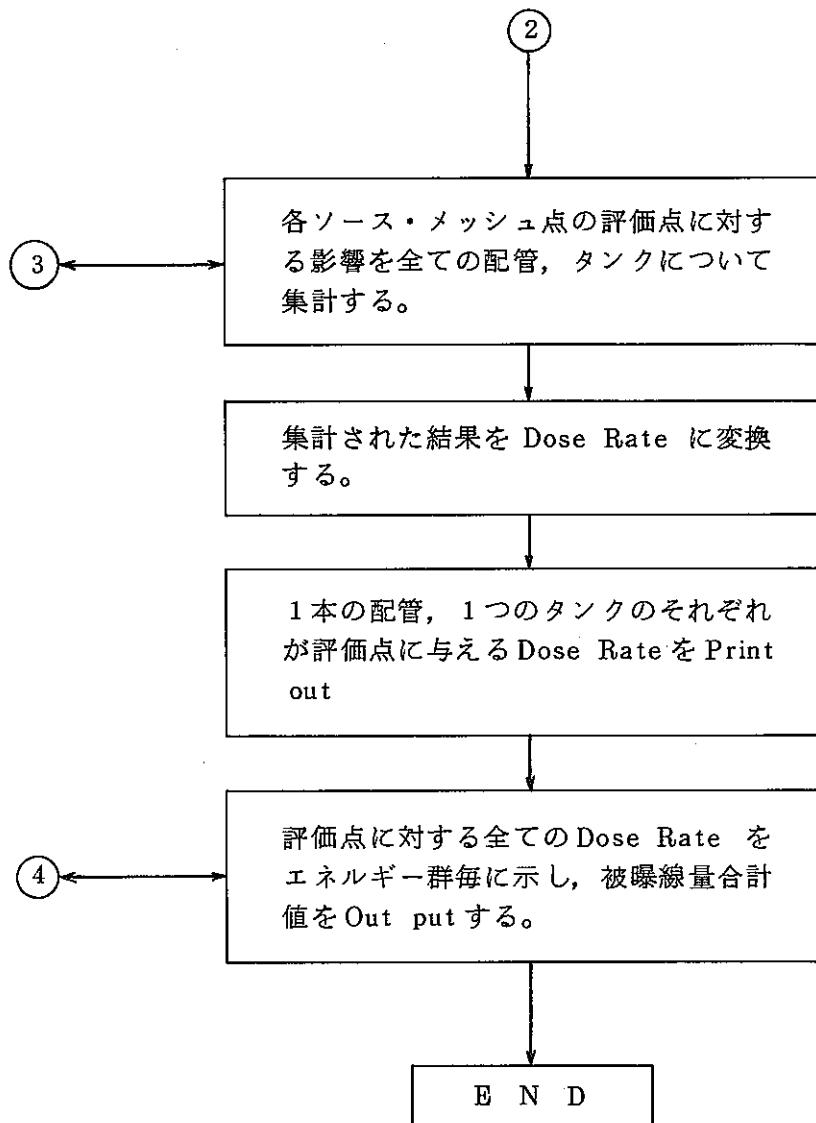


図 4 QAD-FUGEN コードのブロック・チャート（つづき）

3. QAD-FUGENの入力データのフォーマット

QAD-FUGEN の入力データのフォーマットを、①ディジタイザによる入力と②カードによる入力、にわけて以下に説明する。

3.1 ディジタイザによる入力データのフォーマット

(1) タイトル・カード

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
C	ID(I) I = 1, 8																																																																														

ID(I) I = 1, 8

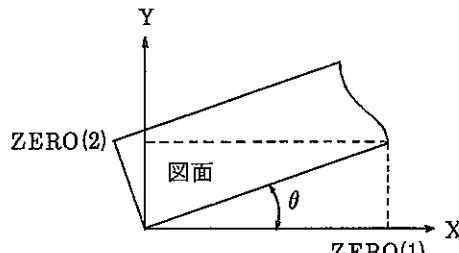
計算のタイトル名 70 キャラクタ(任意の英数字)

(2) 原点補正データ入力

	10		20		30		40		50		60		70		80		
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
2	ZERO(1)			ZERO(2)													

1 ORIGIN

2 ZERO(1) ZERO(2) (F 7.3 , 1X , F 7.3)



$\theta = -\text{ATAN2}(\text{ZERO}(2), \text{ZERO}(1))$

次のORIGINデータが来るまで有効

(3) スケール・データ

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
XS	XS										YS										(2 X, 2 F 10.0)																																																										

XS : X方向のスケール $\frac{1}{100}$ は、 100.0 と記入。

YS : Y方向のスケール $\frac{1}{100}$ は、 100.0 と記入。もし、 YS = 0 ならば、 YS = XS とする。

(4) パイプ・データ

	10	20	30	40	50	60	70	80
1	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80							
2	P 1 : NMPIP(I)		(1X, A15)					
3	X	Y						
4	X1	Y1						
5	X2	Y2						

NMPIP(I) : 配管名を記入 15 キャラクタ(任意の英数字)

① 平面図で垂直な配管の場合、中心座標を記入

② A . B X, Y 軸に平行に走った配管の場合、A は X, Y の値の小さい方

(5) タンク・データ

	10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	
T	NMTNK(I)																																																																															

NMTNK(I) : タンク名を記入 10キャラクタ(任意の英数字)

座標データは、(4)パイプデータに同じ

(6) 壁 デ 一 タ

10										20										30										40										50										60										70										80																																																																																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80																																																																																															
W	N	(1X, I6)																																																																																																																																																																												
N : 壁番号																																																																																																																																																																														
X ₁			Y ₁																																																																															①																																							④															③																																						
X ₂			Y ₂																																																																															②																																																																																												
X ₃			Y ₃																																																																															③																																																																																												
X ₄			Y ₄																																																																															④																																																																																												
壁を伏せた図																																																																																																																																																																														

(8) ディジタイザ入力の終り

10	20	30	40	50	60	70	80
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40	41 42 43 44 45 46 47 48 49 50	51 52 53 54 55 56 57 58 59 60	61 62 63 64 65 66 67 68 69 70	71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
E N D	ディジタイザ入力の終り						

3.2 カードによる入力データのフォーマット

(1) タイトル・カード

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
TI	NBLD	IPLT	STTM										ID(I), I = 1, 18																																																																		

NBLD : Build up factor を指定する。

- = 1 : H₂O Dose Build up factor 指定
- = 2 : Al Dose Build up factor 指定
- = 3 : Fe Dose Build up factor 指定
- = 4 : Pb Dose Build up factor 指定

IPLT = 0 線量率計算をする

- = 1 配管, 壁, タンクを図面出力する。計算せず。

STTM < 0.0 : 炉停止時間(sec)

- = 0.0 : 炉運転中

ID(I), I = 1, 18 : タイトル名 70 キャラクタの任意の英数字

(2) タンクのソース・メッシュデータ

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
TM		ITR		ITZ		ITPHI		(A2, 3X, 315)																																																																							
ITR, ITZ, ITPHI : R, Z, ϕ 方向のメッシュ数。もし、このカードが入力されない場合は、ITR = 10, ITZ = 20, ITPHI = 10 となる。																																																																															

(3) パイプのソース・メッシュデータ

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
PM		PMSH										(A2, 3X, F10.0)																																																																			

PMSH: パイプのメッシュ長さを指定する(パイプの軸方向のメッシュについてのみ有効)(単位: cm)

R=1, $\varphi = 2$ に固定

もしこのカードが入力されない場合は, PMSH=1.00 cmとなる。

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
A ₁										A ₂										A ₃										A ₄										A ₅																																							

(8 F 1 0.0)

A_i : 原子番号に対応する密度を記入 (g/cc) (1 ≤ i ≤ 15)

(4) 物質組成データ

10								20								30								40								50								60								70								80																							
i	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
CM	IC	IA ₁		IA ₂		IA ₃		IA ₄		IA ₅																																																																					

(16(2X, 13))

IC : 組成番号, (IC ≥ 6) IC < 6 は, すでに Program 内部に記憶されている。

= 1 : 水

= 2 : 空気

= 3 : 鉄

= 4 : コンクリート

= 5 : 鉛

IA_i : 物質を構成する原子番号 (1 ≤ i ≤ 15)

(5) 線 源 デ 一 タ

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
SZ	N	IA ₁				A ₁				IA ₂				A ₂																																																																	

(A6 , F 9.0)

N : 使用する線源の線源番号

IA₁ : 使用する線源の核種名A₁ : 使用する線源の核種の線源強度 (μ Ci / cc)

4. サンプル解析

4.1 サンプル問題

図 5 に示すような形状のタンク及び配管からのガンマ線の評価点 R 1～R 4 での線量率を計算する。但し、 W_1 、 W_2 、 W_3 の遮蔽壁がそれぞれ存在するものとする。

4.2 サンプル入力

表 1 にサンプル問題（検証用モデル）の入力データ（データ 1 及びデータ 2）を示した。

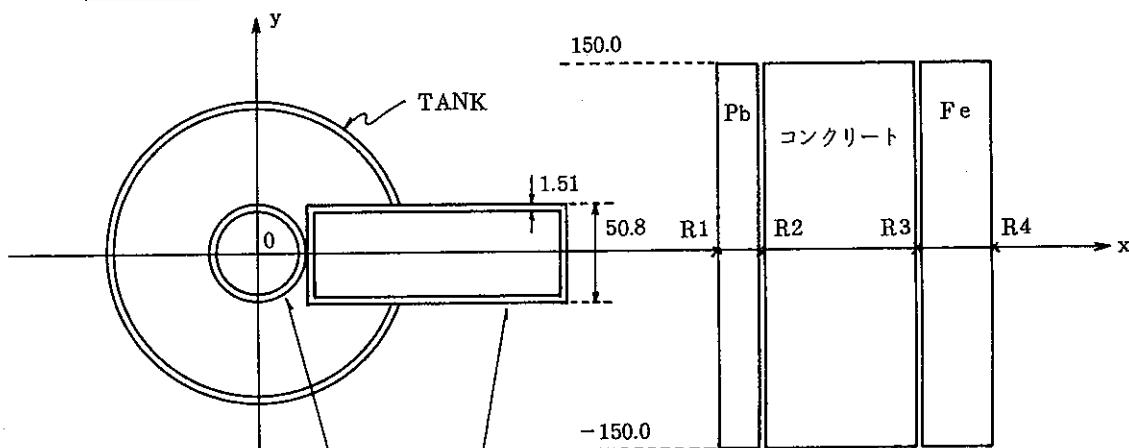
4.3 解析結果

解析結果をまとめて表 2 に示した。また、出力リスト例を表 3 に示した。

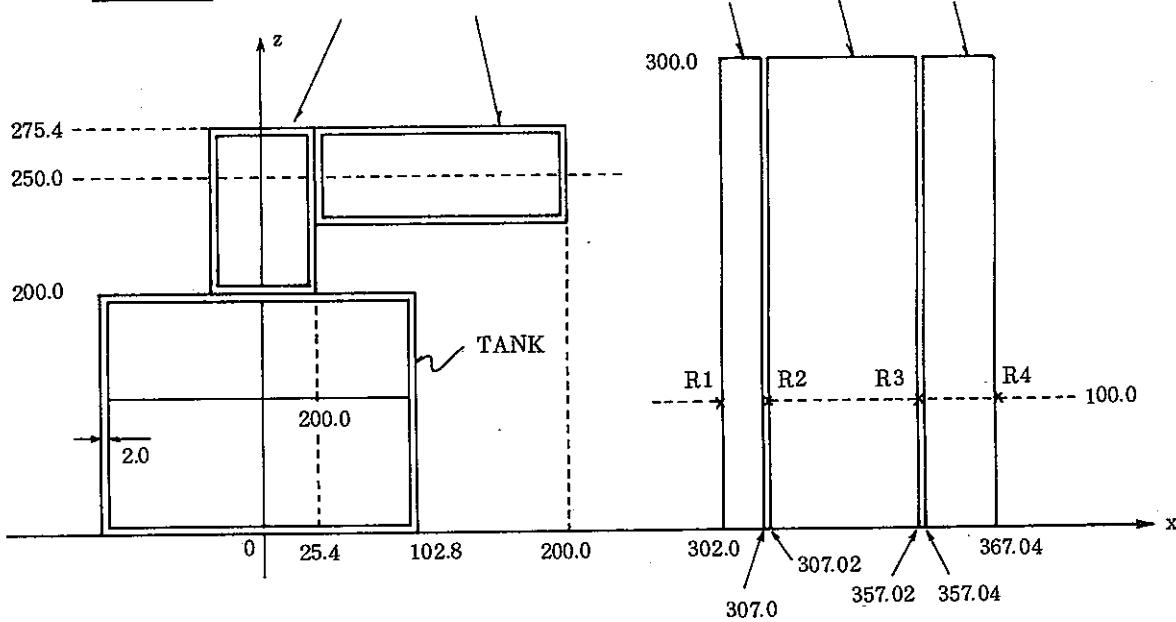
表 2 検証用モデルの解析結果

RECEIVER NUMBER	線量率 (mR/h)	距離 (m)
1	1.2048E+02	3.0199E+02
2	9.9352E+00	3.0701E+02
3	4.0145E-02	3.5703E+02
4	1.0861E-03	3.6705E+02

平面図



断面図



評価点位置	x 座標
R1	301.99
R2	307.01
R3	357.03
R4	367.05

図 5 遮蔽解析コード検証用モデル図

表3 検証用モデルの出力リスト例

CHECK MODEL (PNC)

RECEIVER NUMBER	1	COORDINATES -	X	3.0199E+02	Y	0.0	Z	1.0000E+02
-----------------	---	---------------	---	------------	---	-----	---	------------

GRP NO	MEAN ENERGY MEV	ENERGY GROUP LIMITS MEV	DIRECT BEAM FLUX /CM**2/SEC	MEAN BUILDUP FACTORS	DIRECT DOSE RATE BEAM WITH BUILDUP MR/HR
TOTAL	1.3889	0.20-5.5	1.9150E+04	2.7756E+00	4.3406E+01
W/BU	1.3835				1.2048E+02
1	0.3200	0.0 - 0.32	0.0	0.0	0.0
2	0.5000	0.32 - 0.5	0.0	0.0	0.0
3	0.8000	0.5 - 0.8	0.0	0.0	0.0
4	1.0000	0.8 - 1.0	2.0680E-01	3.2435E+00	3.7223E-04
5	1.2500	1.0 - 1.25	8.5118E+03	2.9188E+00	1.7875E+01
6	1.5000	1.25 - 1.5	1.0638E+04	2.6753E+00	2.5531E+01
7	2.0000	1.5 - 2.0	0.0	0.0	0.0
8	2.5000	2.0 - 2.5	8.3229E-02	2.1608E+00	2.8298E-04
9	3.0000	2.5 - 3.0	0.0	0.0	0.0
10	4.0000	3.0 - 4.0	0.0	0.0	0.0
11	5.0000	4.0 - 5.0	0.0	0.0	0.0
12	6.0000	5.0 - 6.0	0.0	0.0	0.0
13	6.2000	6.0 - 6.2	0.0	0.0	0.0
14	7.2000	6.2 - 7.2	0.0	0.0	0.0