



放射線治療用直線加速装置に 関する調査報告

平成21年8月25日

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構

1

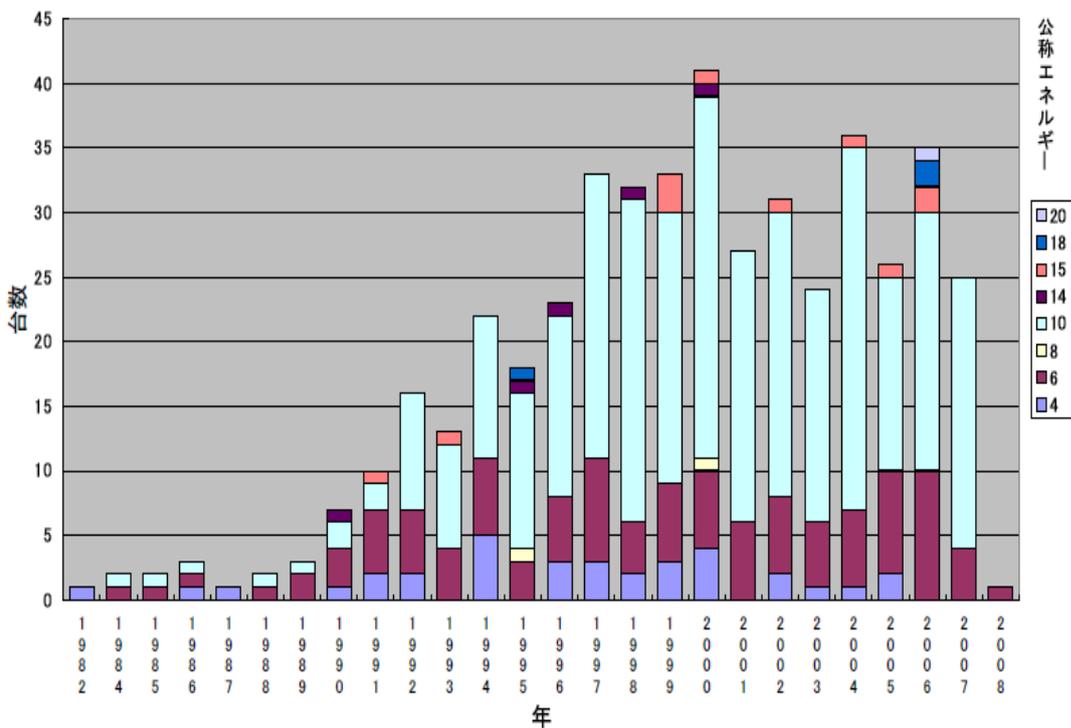
使用状況調査

- 日本放射線技術学会の協力により、アンケート調査を実施
- 平成19年11月～20年1月までの回答を対象
- 医療機関740施設(874台)のうち412施設から、479台について回答を得た
- 475台について、有効回答として集計

2

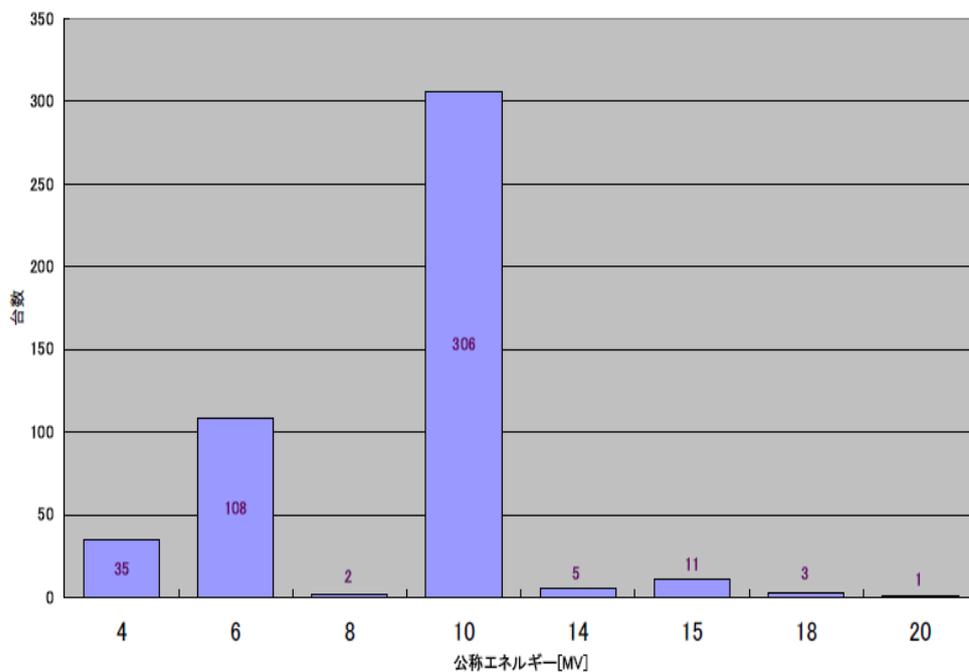
現有機器の購入年

装置購入時期

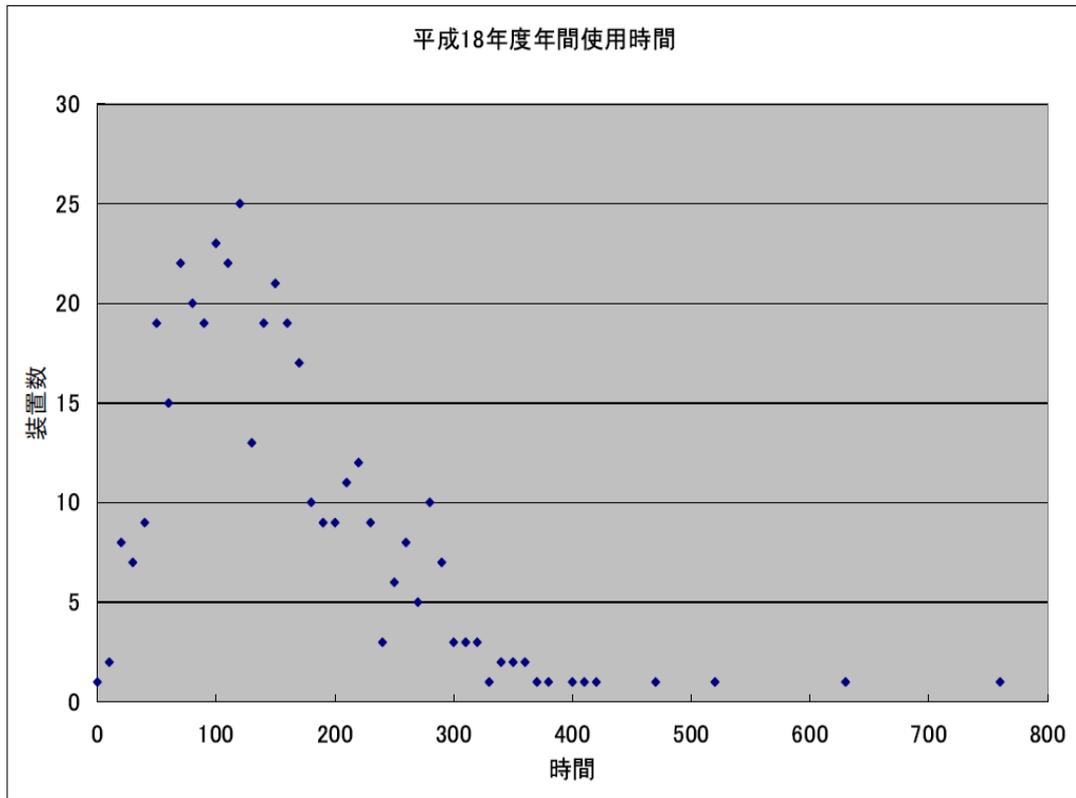


X線最大エネルギー別台数

エネルギー別台数

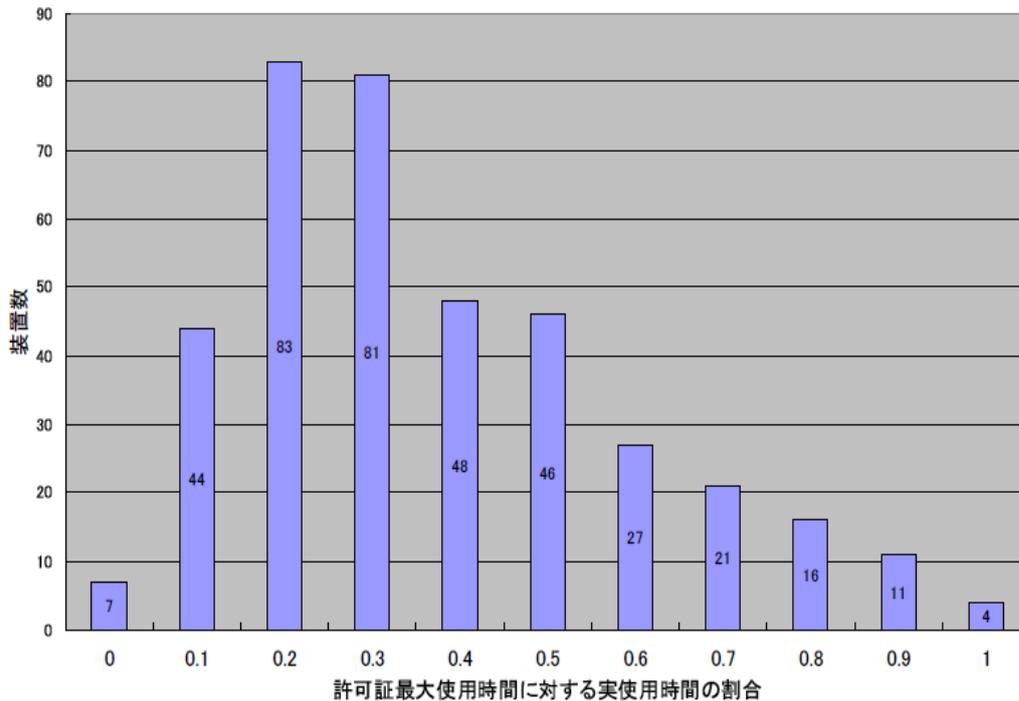


使用時間



使用時間／許可時間

許可証最大使用時間(／3月)と実使用時間



使用状況のまとめ

設置して10年以内のものが多い。

X線最大エネルギー
10MeV未満：31%
10MeV：65%
10MeV超：4%

X線照射が主
1日40件程度の照射
正味運転時間：1日1時間以内
実使用時間は許可時間の20～30%程度

方向利用率は
上:下:左右=1:1:0.5



7

重点検討課題

- 6, 10, 15MeVの系統的評価
- 中性子測定手法の検討（感度、精度）
 - TLTと個人線量計の併用
 - 照射室内、遮蔽体内外の空間分布の測定
- 中性子発生量の計算と放射化計算
 - 図面と実測による運転条件、遮蔽構造の正確な把握
 - 計算と実測値との比較検討
- 運転停止時測定による放射化部位、放射化核種の確認
- 試料採取と分析
 - 照射室内からの試料の採取と測定

8

調査施設

- 熊本大学 10MeV, 15MeV
- 獨協医科大学 6MeV, 10MeV
- 徳島大学 4(10), 10(6)MeV
- 東北大学 15(6)MeV
- 船橋市民医療センター 6MeV
- 広島大学病院 18MV
- 横浜労災病院、国立埼玉病院、東邦大
大森病院、国立がんセンター中央病院

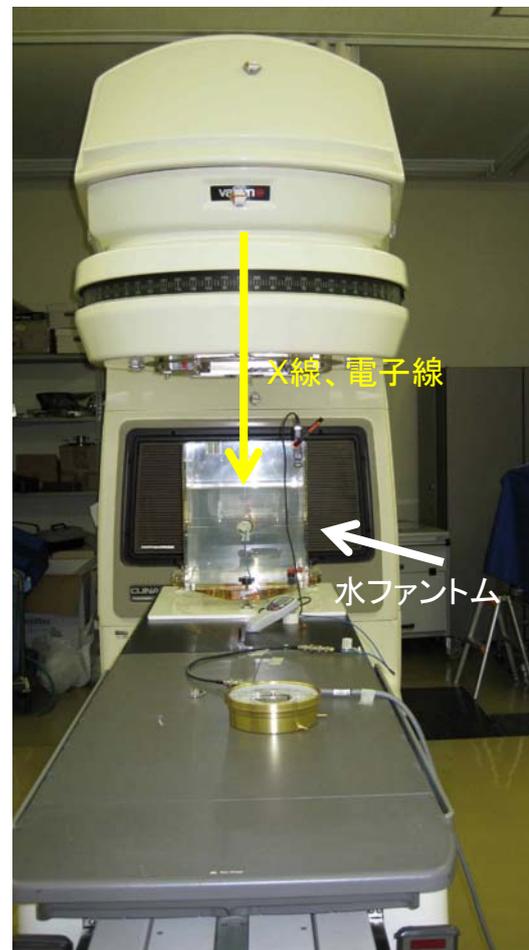
9

中性子の発生

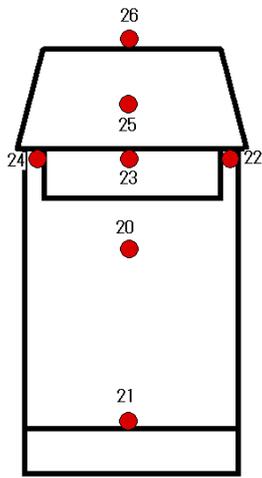
Varian Clinac 2300 C/D
加速エネルギー: 18MeV
照射時間: 1分間

各種運転条件下での中性子線量を測定

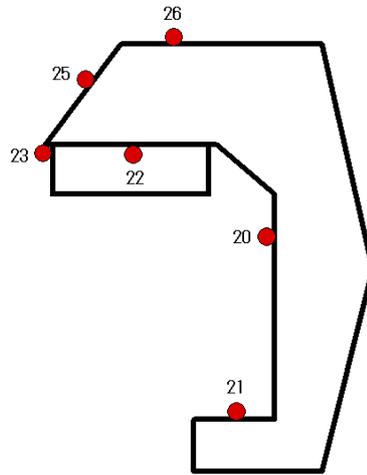
- Run-1: 電子線照射 (ターゲット無)
- Run-2: X線照射 (照射野40cm × 40cm)
- Run-3: X線照射 (マルチリーフコリメータ入り)
- Run-4: X線照射 (スチールフィルター入り)
- Run-5: X線照射 (鉛フィルター入り)
- Run-6: X線照射 (照射野0.5cm × 0.5cm)



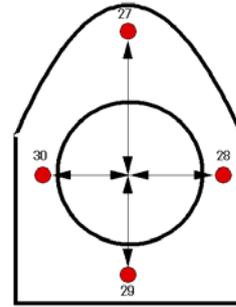
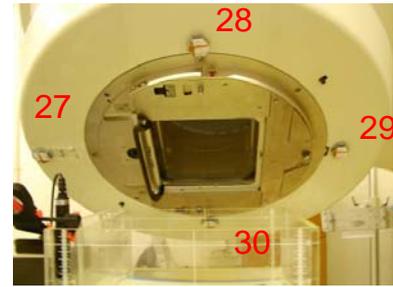
測定位置



前面

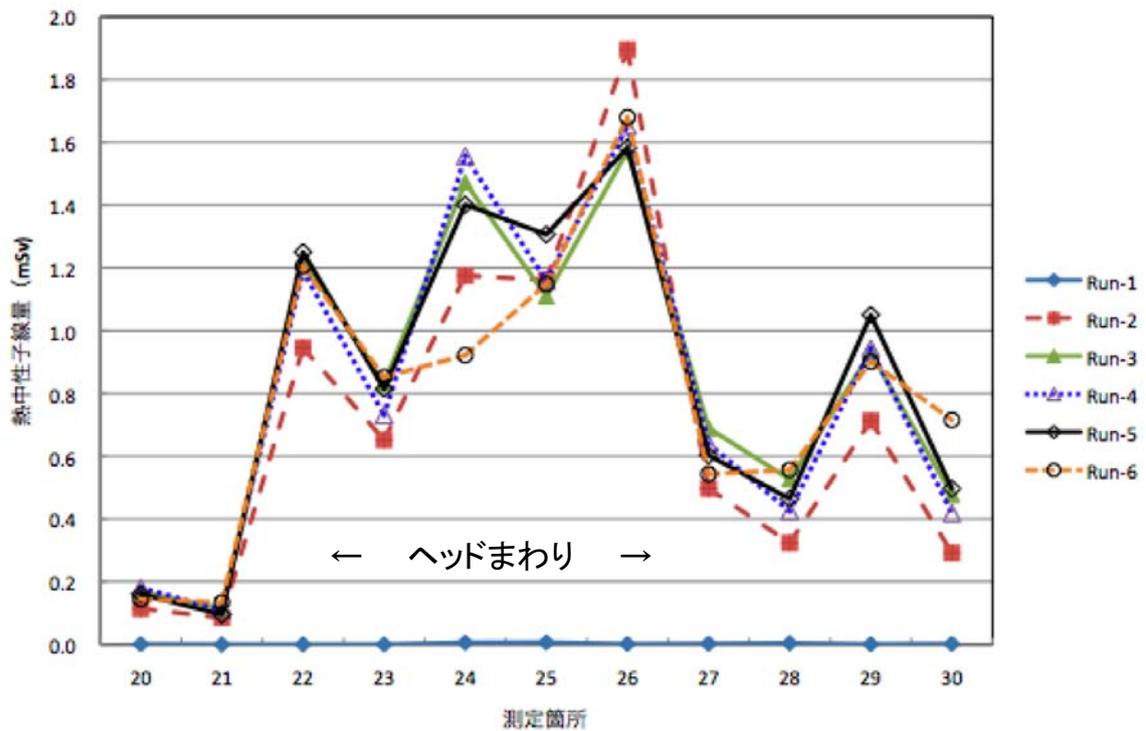


側面

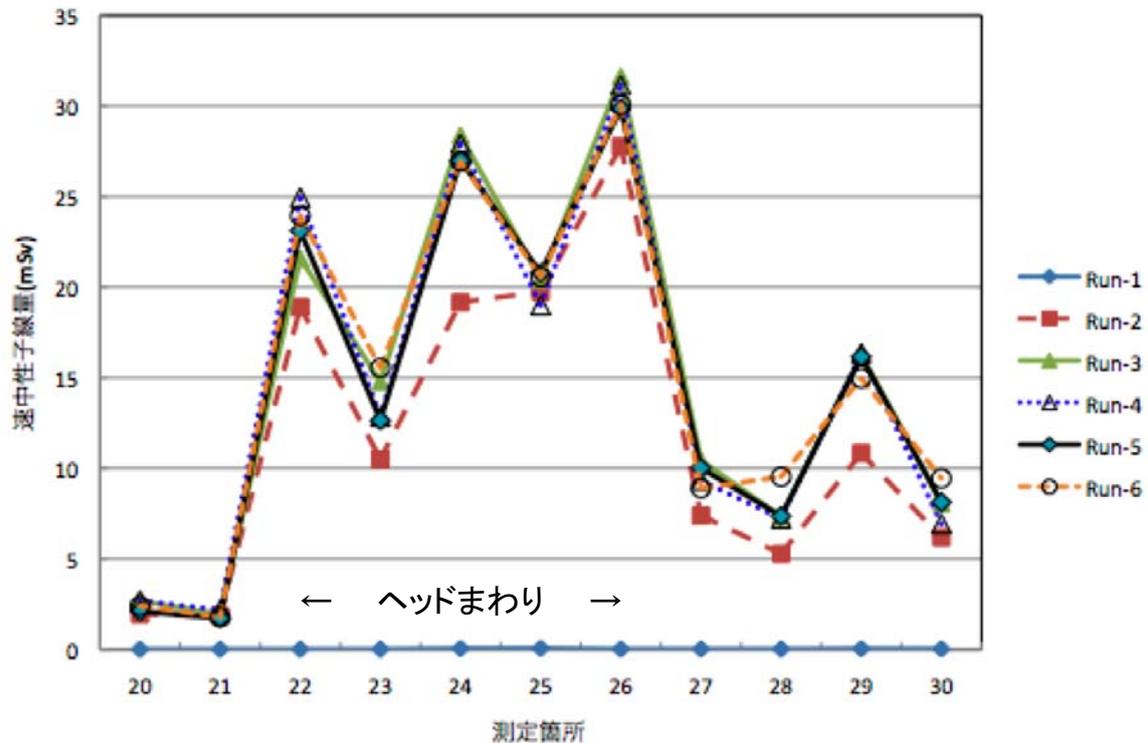


ガントリヘッド下から

熱中性子線量



速中性子線量



中性子の発生状況

- 電子線照射では、検出できなかった。
- 照射野を絞る、コリメータを入れることで中性子発生量に大きな変化はなかった。
- 中性子の漏洩は、ガントリヘッド廻りからであった。最も高いのは、ヘッド上部。

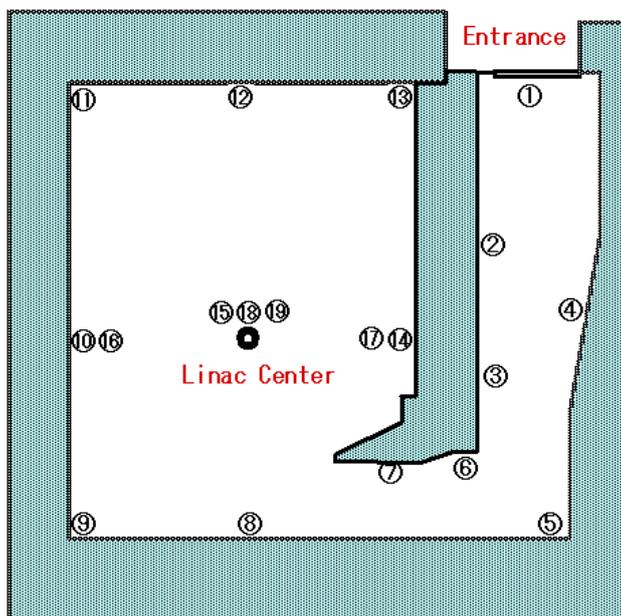
→ ターゲットに近い位置で線量が高い

→ 中性子はターゲットから主に発生

中性子分布測定

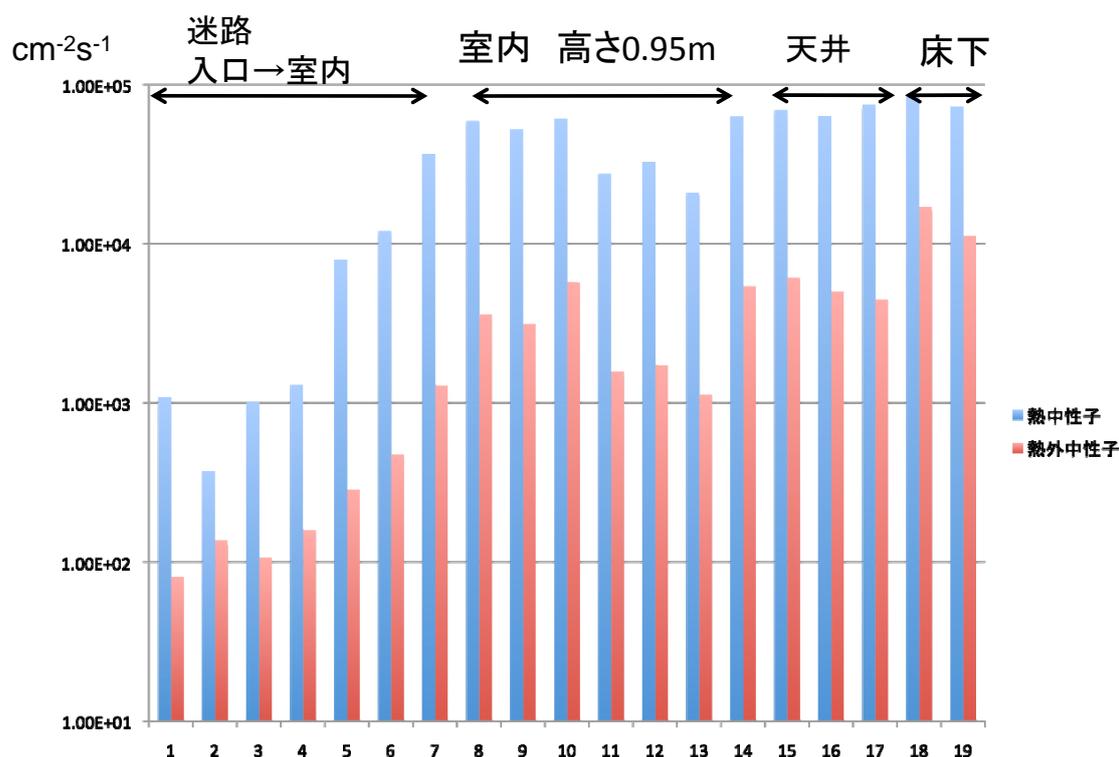
1日間、
室内各所に金箔、
TLD、CR-39を配置
して中性子測定

正味運転時間は
11.1分



15

金箔による熱中性子フラックス測定結果



16

中性子の分布

- 金箔の結果はTLD、CR-39による測定結果とも良く一致した。
- 熱中性子フルエンス率はNo.4までの迷路側で 10^3 乗、治療室に入るところで 10^4 乗に増加し、室内は概ね 10^5 乗程度になっている。
- 熱外中性子は、熱中性子のフルエンス率にほぼ比例しており、約10分の1である。
- Cd比は 1.92 ± 0.46

17

試料採取による中性子フラックス測定

壁コンセントプレートのビスの採取(20個)

γ線測定、蛍光X線による成分分析

真鍮製: Zn 35%、Zn-65を検出

過去5年間(43392時間)での18MeVでの照射時間は272.28時間であった。

運転中の平均的中性子フラックス($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)を算出

金箔での測定結果と良く一致

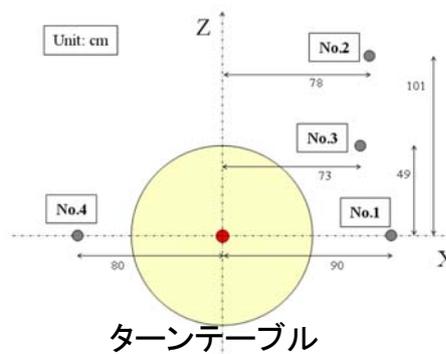


No.		ビス	金箔	比
4	迷路入口から 4m	$(5.7 \pm 0.3)E+03$ (n:2)	$1.29E+03$	4.4
8	リニアックの正面の壁	$(5.1 \pm 0.4)E+04$ (n:4)	$5.89E+04$	0.9
10	リニアックに向かって左側壁	$(7.5 \pm 1.7)E+04$ (n:4)	$6.10E+04$	1.2
11	リニアックに向かって左奥側の壁	$(3.5 \pm 0.2)E+04$ (n:2)	$2.74E+04$	1.3
14	リニアックに向かって右側壁	$(7.5 \pm 0.9)E+04$ (n:8)	$6.29E+04$	1.2

18

放射化状況

- 円の中心:ヘッド直下
 - X軸:ヘッドの回転方向
 - Z軸:リニアック本体側
- コアの直径は6cm
 - 表層側から2cm毎に切断
 - No.1:表層から6cm、No.3:表層から10cm、No.4:表層から8cmまで、それぞれ約100000秒間測定



コンクリートコア採取位置

19

コンクリート中に検出された放射性核種と放射能 (Bq/g)

No.	Co-60	Eu-152	Sc-46	K-40
1	(6.9±1.9)E-04 (n:3)	(1.3±0.2)E-03 (n:2)	(7.7±2.0)E-04 (n:3)	(2.9±0.6)E-01 (n:3)
3	(7.9±2.6)E-04 (n:5)	(1.8±0.4)E-03 (n:3)	(8.0±3.5)E-04 (n:5)	(2.9±0.4)E-01 (n:5)
4	(9.7±2.7)E-04 (n:4)	(1.8±0.4)E-03 (n:4)	(1.1±0.3)E-03 (n:4)	(3.1±0.2)E-01 (n:4)

K-40(天然放射性核種) = 約0.3Bq/g

Co-60、Eu-152、Sc-46は熱中性子捕獲反応で生成

No.1試料では速中性子反応生成物も検出

Na-22=(7.4±4.2) × 10⁻⁴ Bq/g、Mn-54=(4.9±1.5) × 10⁻⁴ Bq/g

K-40を除き、検出感度の2倍程度の放射能であった

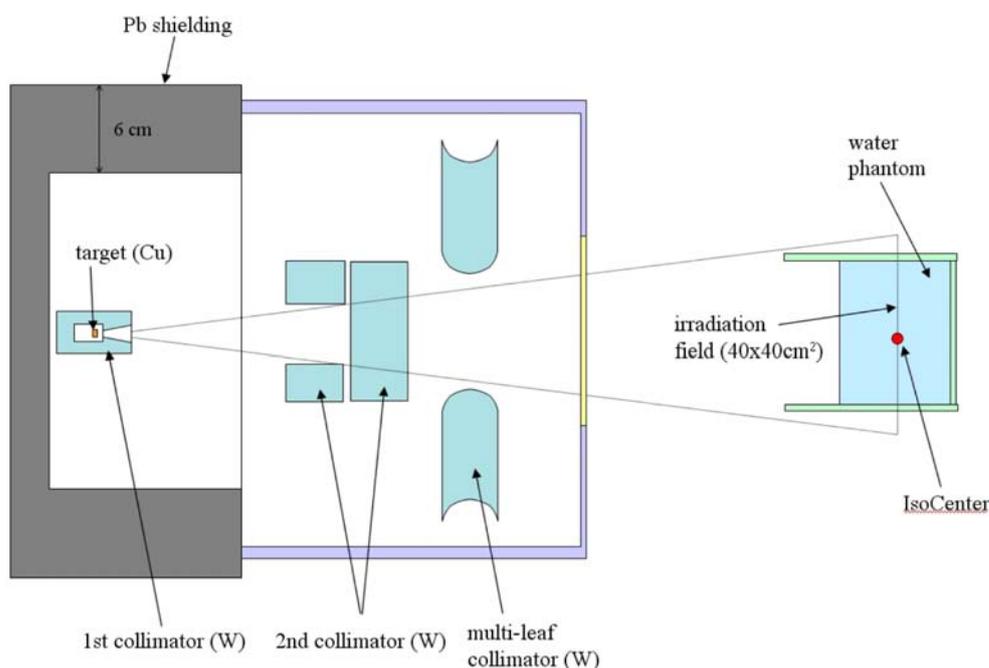
20

モンテカルロ計算による評価

- 3次元モンテカルロ計算コードMCNP5
- 線源は18MeV電子(平均電流 $21.6 \mu A$)
- ターゲットは厚さ1cmの銅板
- 水ファントムにX線を照射
- 簡易型計算モデル: ターゲットを鉛で囲う構造 + タングステン製第1、第2コリメータ、マルチリーフコリメータ
- 詳細型計算モデルでは、ヘッド部分を実測し、より詳細に再現したものである。

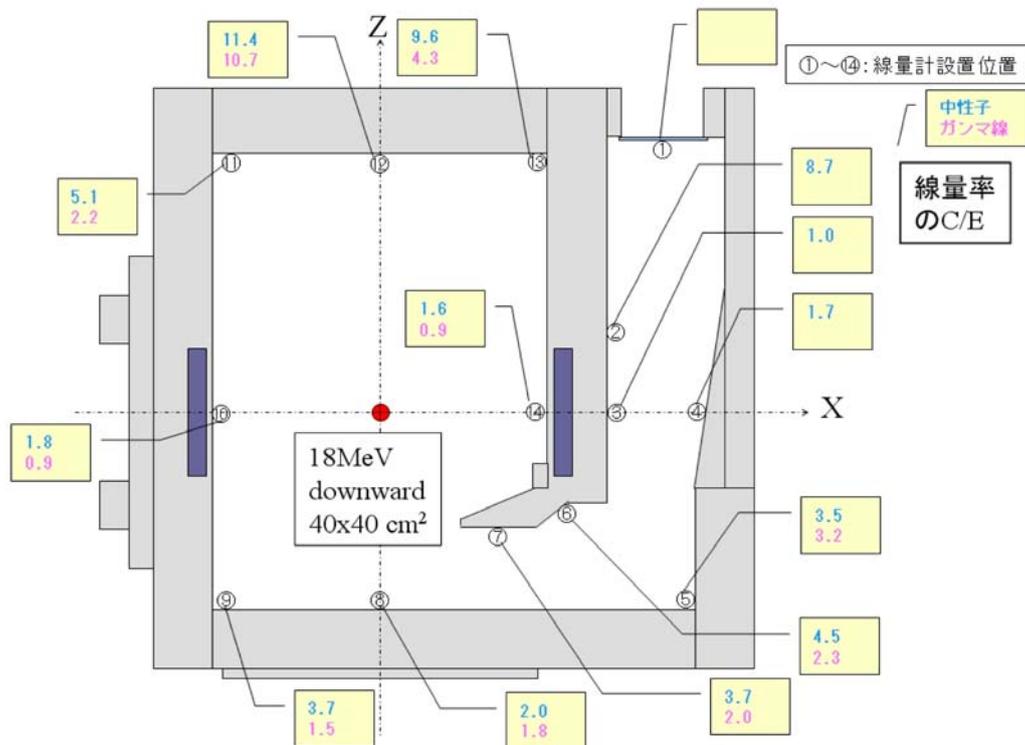
21

簡易型計算モデルでの遮蔽構造



22

照射野40cm × 40cmでの中性子線及びγ線線量率の簡易型計算モデルでの計算結果と実測値の比



23

室内の計算結果

- 中性子線量: 迷路側のNo.2、リニアック本体の背面側の壁No.12、13で過大、それ以外のC/Eは5倍以内
- γ線ではリニアックの左右の壁面でC/Eは0.9と1より小さくなった。それ以外の場所では1より大きく過大評価になった。とくに、リニアック本体の背面側の壁No.12で過大な結果が得られた。

24

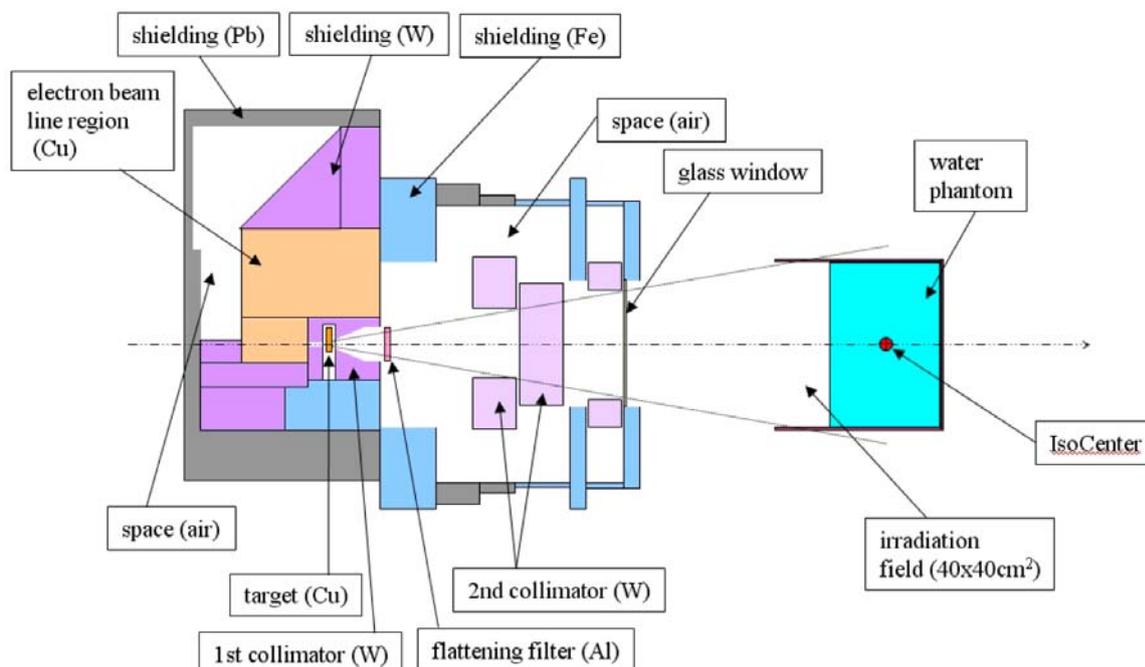
本体廻りの簡易モデル計算結果

No.	コメント	ガンマ線			中性子		
		測定値	計算値	C / E	測定値	計算値	C / E
		[mSv/h]	[mSv/h]		[mSv/h]	[mSv/h]	
20	本体(床+164cm)	945.6	842	0.89	123.4	314	2.54
21	本体(床+53cm)	6838.8	2066	0.30	115.6	218	1.88
22	ヘッド下部右側面	286.2	9874	34.50	1191.1	4155	3.49
23	ヘッド下部正面	273.6	11641	42.55	668.8	5644	8.44
24	ヘッド下部左側面	225.6	9640	42.73	1220.8	4192	3.43
25	ヘッド中央正面	99.0	1510	15.25	1254.7	8364	6.67
26	ヘッド上部	61.2	10858	177.42	1780.2	21811	12.25
27	出口面前方	2277.0	7469	3.28	473.4	917	1.94
28	出口面右側	2079.0	5686	2.74	336.1	959	2.85
29	出口面後方	2981.4	7481	2.51	692.6	504	0.73
30	出口面左側	1855.2	5496	2.96	388.5	546	1.41

リニアック本体まわりでは実測結果との不一致が大きい。
 中性子線量に比べてガンマ線の方がC/Eが非常にいい。
 → 実際の遮蔽条件を再現できていない

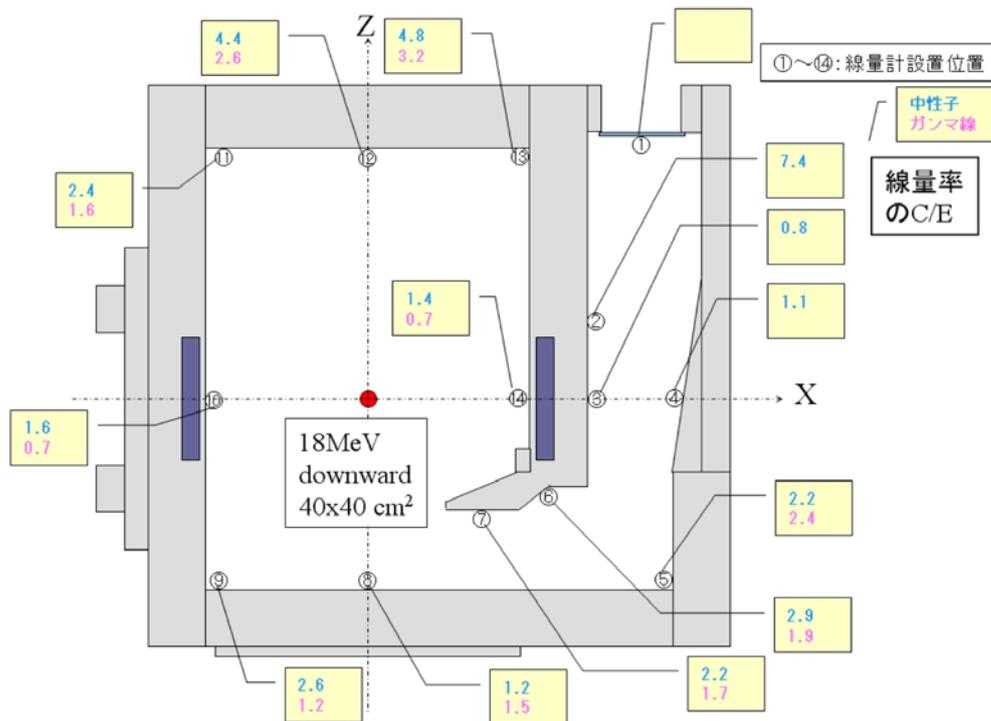
25

詳細型計算モデルでの遮蔽構造



26

照射野40cm×40cmでの中性子線及びγ線線量率の詳細型計算モデルでの計算結果と実測値の比



27

本体廻りの詳細モデル計算結果

No.	コメント	ガンマ線			中性子		
		測定値	計算値	C / E	測定値	計算値	C / E
		[mSv/h]	[mSv/h]		[mSv/h]	[mSv/h]	
20	本体(床+164cm)	945.6	660	0.70	123.4	218	1.77
21	本体(床+53cm)	6838.8	2266	0.33	115.6	169	1.47
22	ヘッド下部右側面	286.2	317	1.11	1191.1	2688	2.26
23	ヘッド下部正面	273.6	810	2.96	668.8	2833	4.24
24	ヘッド下部左側面	225.6	292	1.29	1220.8	2698	2.21
25	ヘッド中央正面	99.0	103	1.04	1254.7	2350	1.87
26	ヘッド上部	61.2	162	2.65	1780.2	4223	2.37
27	出口面前方	2277.0	8885	3.90	473.4	1431	3.02
28	出口面右側	2079.0	8582	4.13	336.1	1316	3.91
29	出口面後方	2981.4	8963	3.01	692.6	1372	1.98
30	出口面左側	1855.2	8514	4.59	388.5	1241	3.19

- ガンマ線の計算結果は非常に改善され、実測値と良く一致した。また、中性子線量もC/Eで最大4.2となり、実際の遮蔽条件をかなり再現できていることが分かった。

28

放射化計算

- 1995年5月～2004年2月 623.94時間
- 2004年3月～2009年2月 272,28時間
- 電子線平均電流: 21.6 μ A
- 床下方向にX線照射として計算
- 放射化計算コードDCHAIN-SP2001
- 中性子スペクトルは、詳細型モデルによる照射野40x40 cm²のMCNP5計算結果 (VITAMIN-Jの中性子175群構造)

29

コンクリート試料の計算結果

- No.1, 3試料の表層1cmの放射能の計算結果を実測値と比較
- 実測結果とほぼ同様の値が得られた。
- Eu-152でRSG1.7の値の50分の1、Co-60で100分の1

	No.1			No.3			No.4		
	測定値(E)	計算値(C)	C/E	測定値(E)	計算値(C)	C/E	測定値(E)	計算値(C)	C/E
Co-60	6.90E-04	8.58E-04	1.24	7.89E-04	1.40E-03	1.77	9.68E-04	3.08E-04	0.32
Eu-152	1.33E-03	8.15E-04	0.61	1.82E-03	1.69E-03	0.93	1.75E-03	3.18E-03	1.82

Eu-152およびCo-60のRSG1.7でのクリアランスレベルは0.1 Bq/g

この他、ガントリヘッド下部の遮蔽材であるステンレス鋼の放射化計算結果では、主要核種としては、Cr-51、Mn-54、Fe-55、Co-60などがあり、1年後においてもMn-54やCo-60がRSG1.7のクリアランスレベルを超えていた。

30

コンクリート試料の計算結果

- No.1, 3試料の表層1cmの放射能の計算結果を実測値と比較
- 実測結果とほぼ同様の値が得られた。
- Eu-152でRS-G-1.7の値の50分の1、Co-60で100分の1

	No.1			No.3			No.4		
	測定値(E)	計算値(C)	C/E	測定値(E)	計算値(C)	C/E	測定値(E)	計算値(C)	C/E
Co-60	6.90E-04	8.58E-04	1.24	7.89E-04	1.40E-03	1.77	9.68E-04	3.08E-04	0.32
Eu-152	1.33E-03	8.15E-04	0.61	1.82E-03	1.69E-03	0.93	1.75E-03	3.18E-03	1.82

Eu-152およびCo-60のRS-G-1.7でのクリアランスレベルは0.1 Bq/g

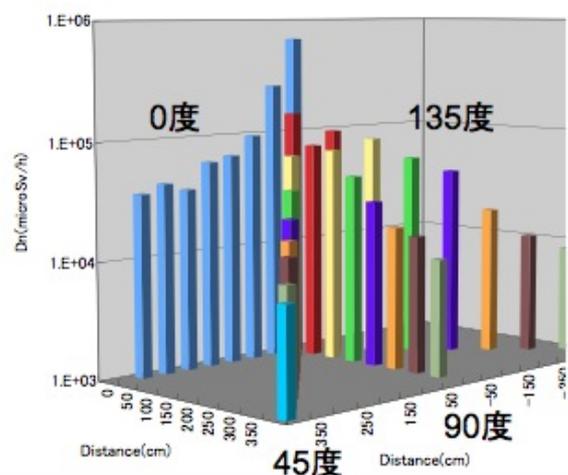
この他、タングステンでの主要核種はW-185である。リニアック下部のステンレスを照射した場合には、Fe-55、Co-60、Mn-54が生成する可能性がある。しかし、総量は1トン以下であり、放射能濃度はBSSの免除レベルの下限数量を超えることはない。

31

15MeVリニアックの例 Varian Clinac iX



中性子分布は等方的

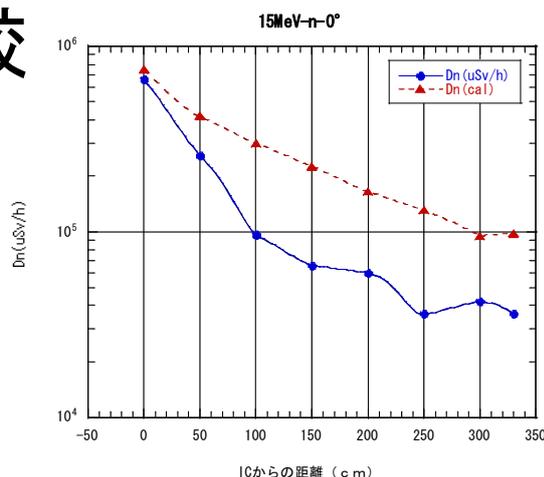


計算と実測の比較

10MeV, 15MeVで中性子線量のMCNP-5での計算と実測の比較

15MeVでファクター3以内で一致実測の方が減衰が早い

10MeVでは検出下限以下で比較できず



15MeV, 0度方向での計算結果

10MeVで床下ビス(SUS304)の放射能測定

Co-60:0.0161Bq/gを検出

10年間、400時間運転として放射化計算→ファクター2以内で一致

ビス(SUS304)の放射能測定結果

	測定値(E)	計算値(C)	C/E
Co-60	1.61E-2	2.92E-2	1.81

評価手法について(1)

- 運転中測定
 - CR-39は測定範囲が狭い、中性子線量ではなくフルエンス算出に変更する必要がある
 - TLDはX線照射方向の中性子測定には向かない
 - 金箔を用いた放射化測定は高感度にフルエンスの測定が可能、空間分布の測定が容易
- 停止時の空間線量測定
 - 10MeV以下のリニアックでは線量が低く、核種同定が難しい

評価手法について(2)

- 試料採取測定
 - 過去の平均的情報が得られる
 - 中性子スペクトルの推定できる
- 計算
 - 運転条件、遮蔽条件の把握する必要がある
 - 10MeV以下では中性子発生が少なく、統計精度が低下する
 - 実測を良く再現できる(ファクター2～3以内)

35

空間線量率

- 6MeV : バックグラウンドレベル(BG)
- 10MeV
 - 運転直後、BGの2倍程度、照射窓で3倍程度
 - 半日で減衰
- 15MeV :
 - 運転直後、ターゲット直下 $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 、壁面 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{Sv/h}$
 - 17時間後、ターゲット直下 $0.6 \mu\text{Sv/h}$ (ターゲットからの線量寄与)、壁面 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{Sv/h}$ (半減)

36

中性子発生量

- 6MeV : 放射化法で検出できず
- 10MeV :
 - 運転時 : 熱中性子 $1 \times 10^3 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、エピサーマル中性子 $1 \times 10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 熱中性子 $10^6 \text{cm}^{-2}/\text{d}$ 、10年で 10^{10}cm^{-2} 程度
- 15MeV :
 - 運転時 : 熱中性子 $2 \times 10^4 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、エピサーマル中性子 $2 \times 10^3 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 熱中性子 $10^{7-8} \text{cm}^{-2}/\text{d}$ 、10年で 10^{11}cm^{-2} 程度
- 18MeV :
 - 運転時 : 熱中性子 $5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、エピサーマル中性子 $4 \times 10^3 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 熱中性子 $10^8 \text{cm}^{-2}/\text{d}$ 、10年で 10^{11}cm^{-2} 程度

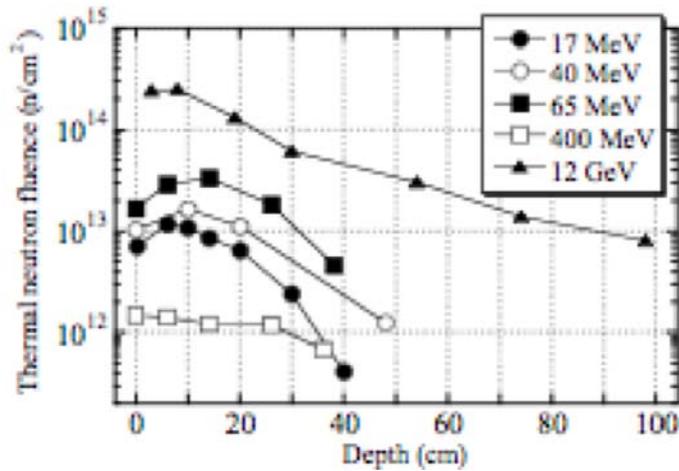
37

放射化

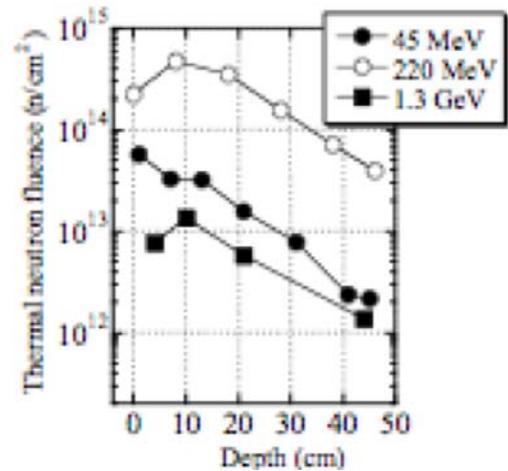
- 6MeV : 放射化物は検出できない
- 10MeV :
 - ターゲット(<1kg)の放射化の可能性はある
 - Ge半導体検出器による測定で、直下の床部分のビスで僅かな放射能(Zn-65:<0.11Bq/g, Co-60:0.016Bq/g)を検出したが、壁コンセントのビスでは検出できなかった
 - 放射化した金属は最大でも数100kg
- 15, 18MeV :
 - ターゲット(<1kg)やコリメータ (<100kg)等加速器本体で放射化の可能性はあるが、放射化した金属は1トン以下
 - 床コンクリートの放射化の可能性はあるが、濃度はCo-60、Eu-152で 10^{-3}Bq/g 程度で最大でRS-G-1.7の1/50以下

38

国内の中大型加速器施設での 中性子フルエンス



粒子加速器



電子加速器

中性子フルエンス=10¹³cm⁻²(10年間)

→ コンクリート中で、Co-60 0.1Bq/g程度生成

これに対し、10MeV直線加速装置では1000分の1、15MeVでは100分の1

39

分類の提案

加速エネルギー	発生装置本体	周辺部分
10MeV未満	放射化無	放射化無
10MeV	ターゲット部分のみ放射化 (長期間保管したものではありません) 物量は1kg以下 (放射エネルギー、濃度はBSS免除 レベル以下)→非遊離性で 汚染対象外	コンクリート:放射化非検出(天然核種のみ) 金属:床下のビスで放射化を検出 最大で数100kg(放射エネルギー、濃度はBSS 免除レベル以下)→非遊離性で汚染対 象外
10MeV超	ガントリーヘッド(ターゲット、 コリメータ周辺部)は放射化、 物量は1トン以下(放射能濃 度はBSS免除レベル以下)→ 非遊離性で汚染対象外	コンクリート:RS-G-1.7の1/100程度、表 層10cm、表面積500m ² として約100トン 金属:1トン以下(放射能濃度はBSS免除 レベル以下)→非遊離性で汚染対象外