

J-PARC MRにおける反跳 中性子防護壁の検討

Masashi J. Shirakata

KEK/J-PARC

PASJ13 (8th to 10th August)

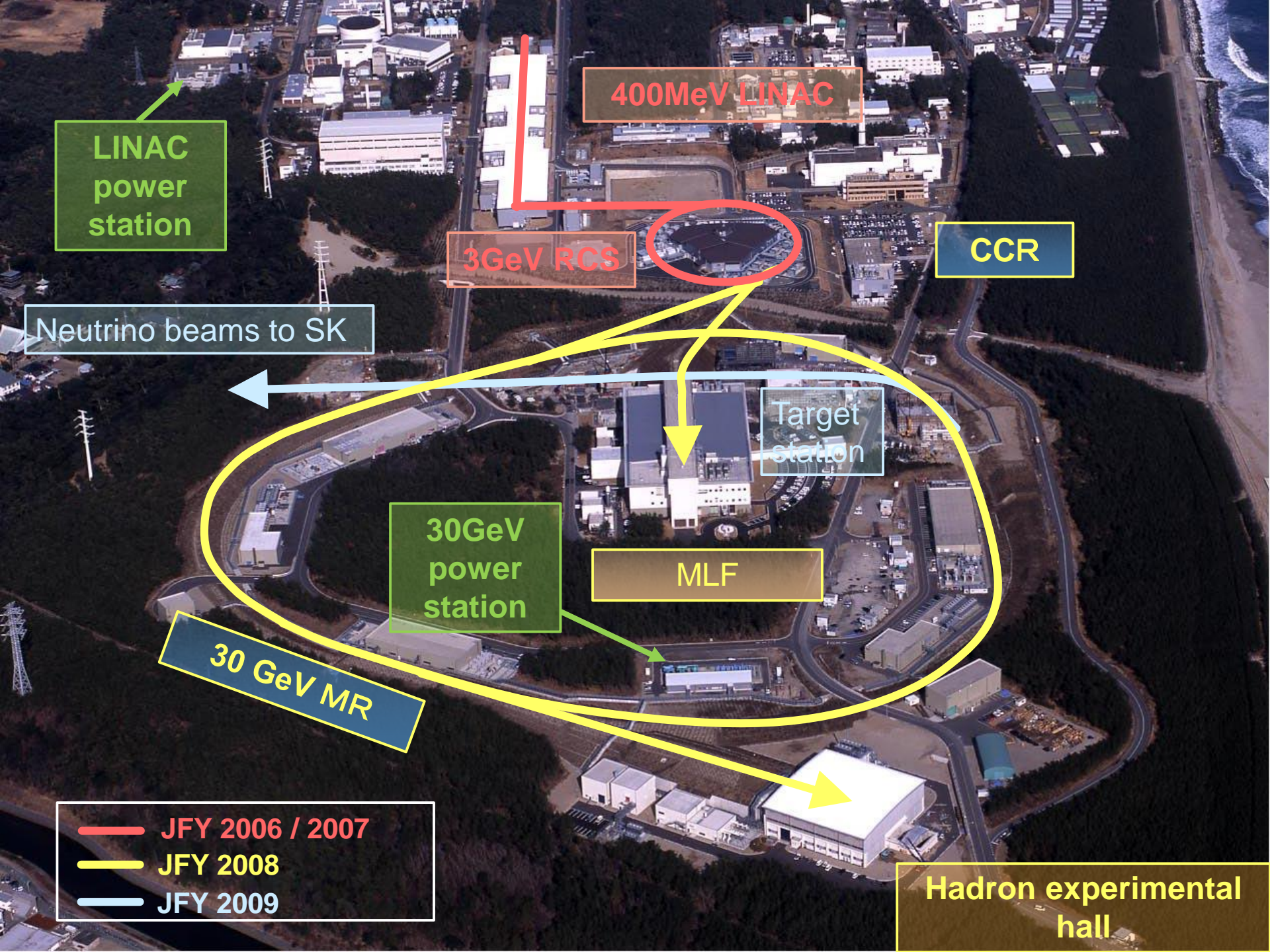
幕張メッセ国際会議場2階、千葉市美浜区中瀬2-1

Contents

- J-PARC MR 入射部の概要
- 新規の遮蔽体はなぜ必要か(そもそもの発端)
ビームコリメータの変更
入射キッカーにおける残留放射線量の変化
- 中性子遮蔽体の検討
- 遮蔽の効果
- まとめ

The background features a central white circle surrounded by several light green, fan-like segments of varying sizes and orientations. A single light blue oval is positioned above the central circle.

J-PARC MR 入射部の概要



400MeV LINAC

LINAC power station

3GeV RCS

CCR

Neutrino beams to SK

Target station

30GeV power station

MLF

30 GeV MR

Hadron experimental hall

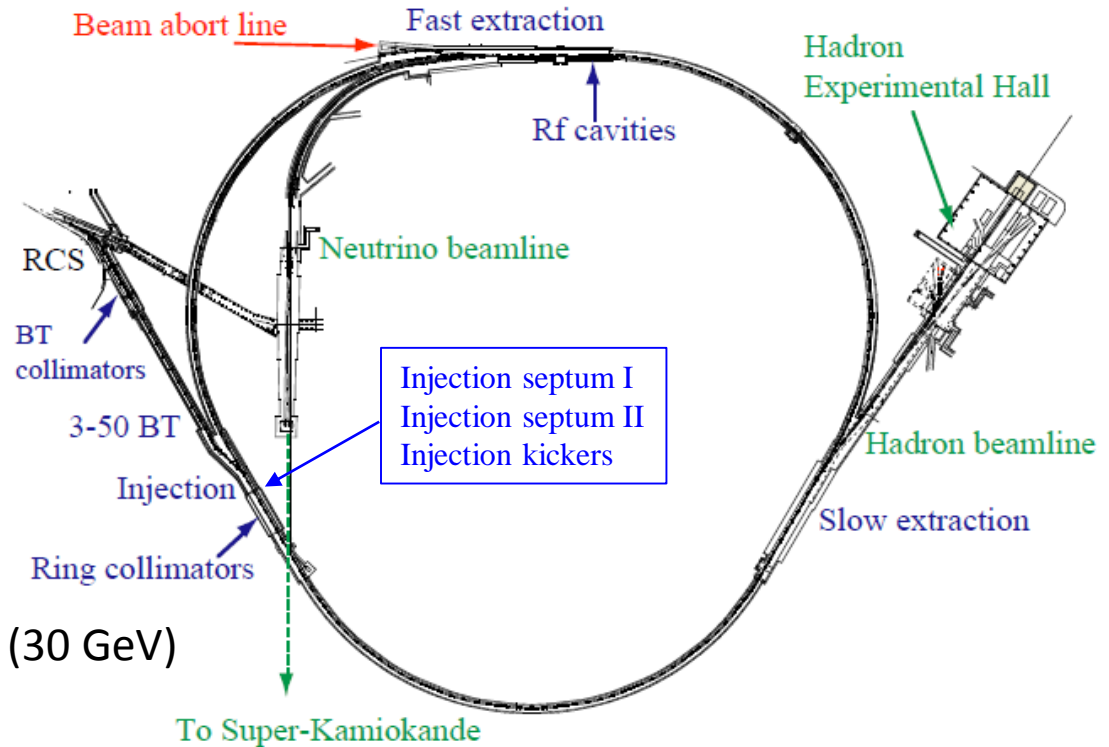
JFY 2006 / 2007

JFY 2008

JFY 2009

Introduction of J-PARC Main Ring

Circumference	1567.5 m
Repetition cycle	2.48 ~ 5.58 s
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV
Superperiodicity	3
harmonic #	9
No of bunches	8
Transition γ	j 31.7
Typical tune	(22.40, 20.75)
Transverse emittance	
At injection	$\sim 54 \pi$ mm mrad
At extraction	$\sim 10 \pi$ mm mrad (30 GeV)



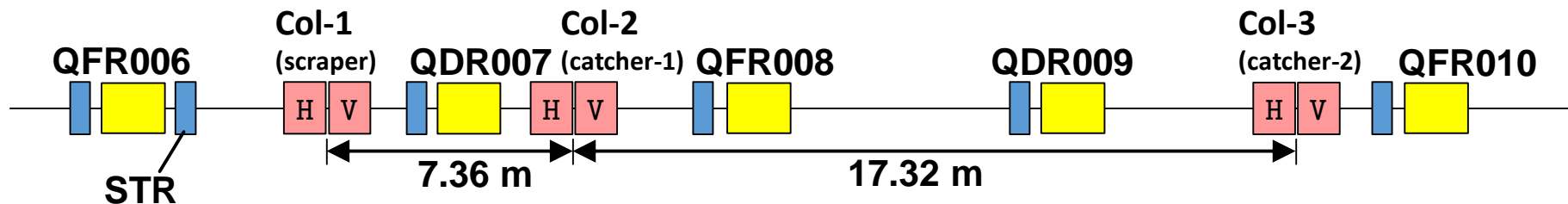
Three dispersion free straight sections of 116 m long:

- Injection and collimator systems
- Slow extraction (SX)
 - to Hadron experimental Hall (Rare decay, hyper nucleus...)
- Rf cavities and Fast extraction (FX) (beam is extracted inside/outside of the ring)
 - outside: Beam abort line
 - inside: Neutrino beamline (intense ν beam is send to SK located 300 km west)

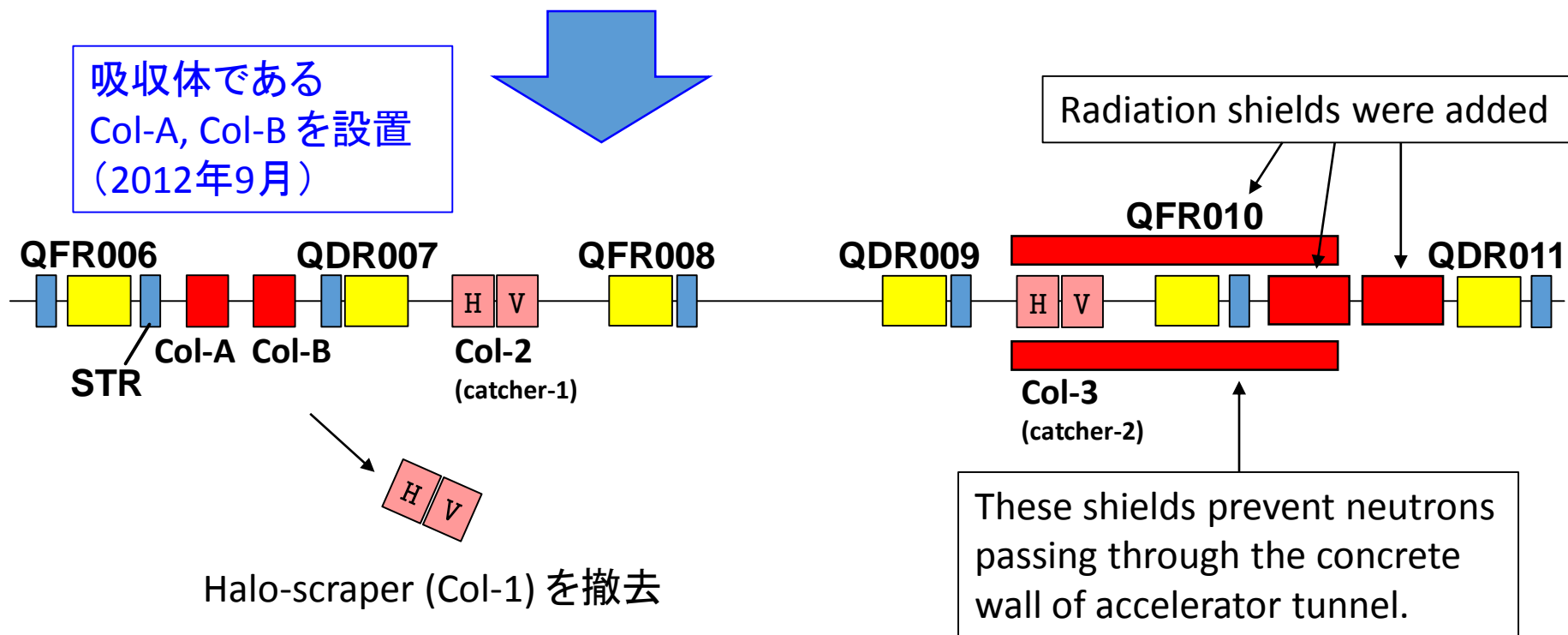
The background features a central white circle surrounded by several light green, fan-like segments radiating outwards. A single light blue oval is positioned above the white circle.

新規の遮蔽体はなぜ必要か

MRコリメータシステムの変更



MRのビームコリメータは、散乱体(Col-1)でハロー成分に散乱を与え、外側に出て来たところを後続の2台のキャッチャー(Col-2, Col-3)で捉える方式だった



2012年のアップデートで、キッカーの下流に散乱体ではなく
コリメータ本体が置かれる事となった

QFR006

Col-A

Col-B

Injection kicker



Beam Loss Distribution

(nx, ny) = (22.40, 20.75)

Collimator configuration:

Col-1, Col-2, Col-3 at address: 007, 008, 010

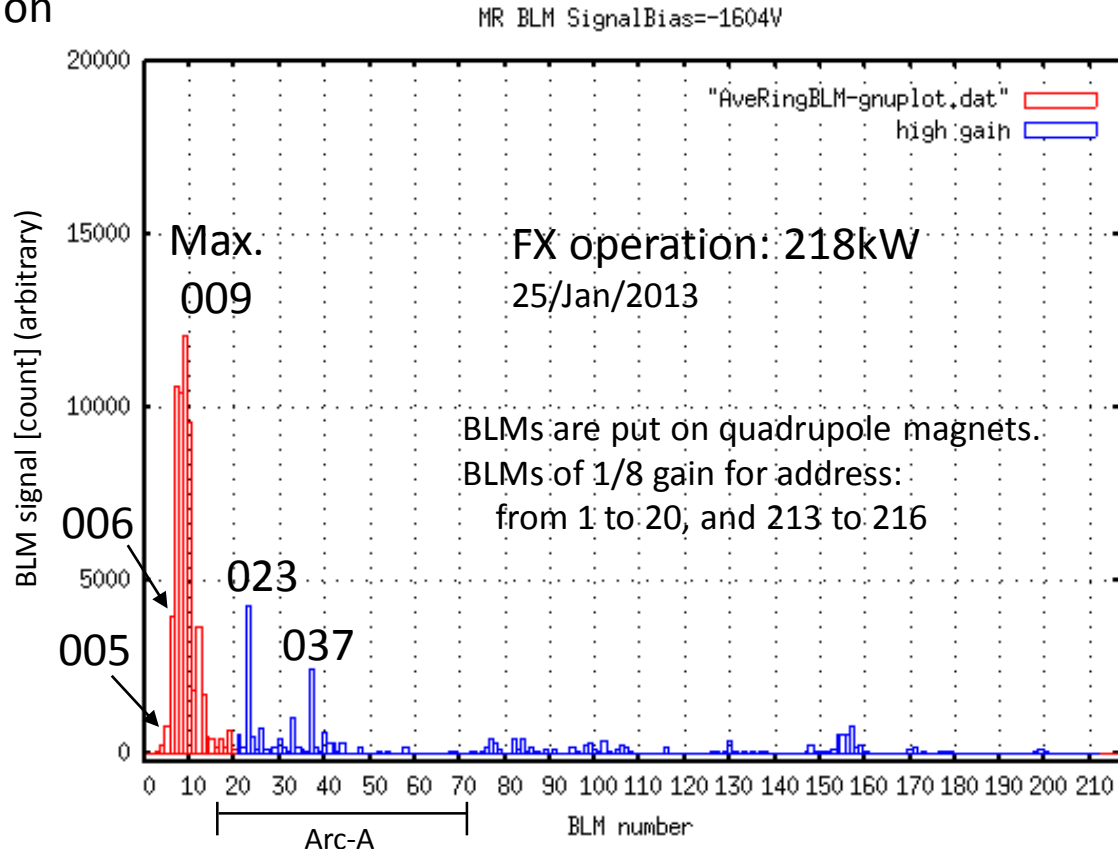
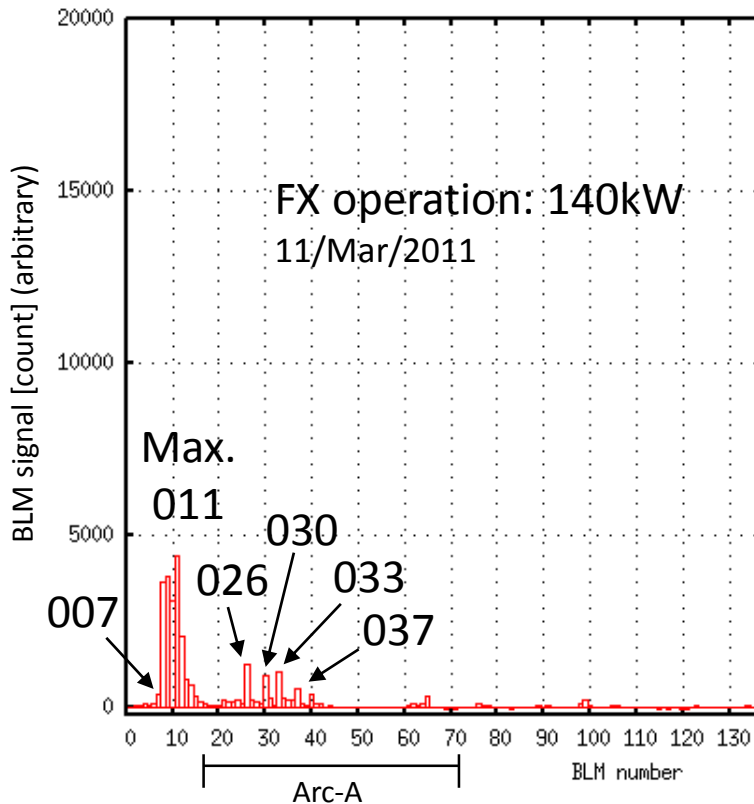
Col-A, Col-B, Col-2, Col-3

2012年10月以降、5番地、6番地では

- Col-Aで後方散乱された二次粒子群が検出されるようになった
- 運転時のビーム強度が1.5倍となり、全体のロス量が増えた

ために、有意な値が見えるようになったが、これによる機器の放射化は小さいと考えていた

Typical beam loss distribution



入射キッカー真空容器の残留線量

- 2012年夏期シャットダウンにおいて散乱体であったコリメータ1がビーム吸収体であるコリメータABに置き換えられた
- 同じ頃、入射キッカーは立ち上がり時間の改善や連続運転時の信頼性向上を目指してダンプ抵抗の交換等を行っていたが、キッカー本体での残留線量が増加していることが発見された
- 入射キッカー周辺はもともと残留放射線量が高くなかったことから、2012年以前の個別の線量記録は多くないが、以下に示すとおり2012年秋以降残留線量が増加している

2011/4/12～2012/6/20

表面: 10~20

30cm: <10 [$\mu\text{Sv/h}$] (上下流共)

2012/11/12

表面: 65

30cm: 20 [$\mu\text{Sv/h}$] (下流容器のみ)

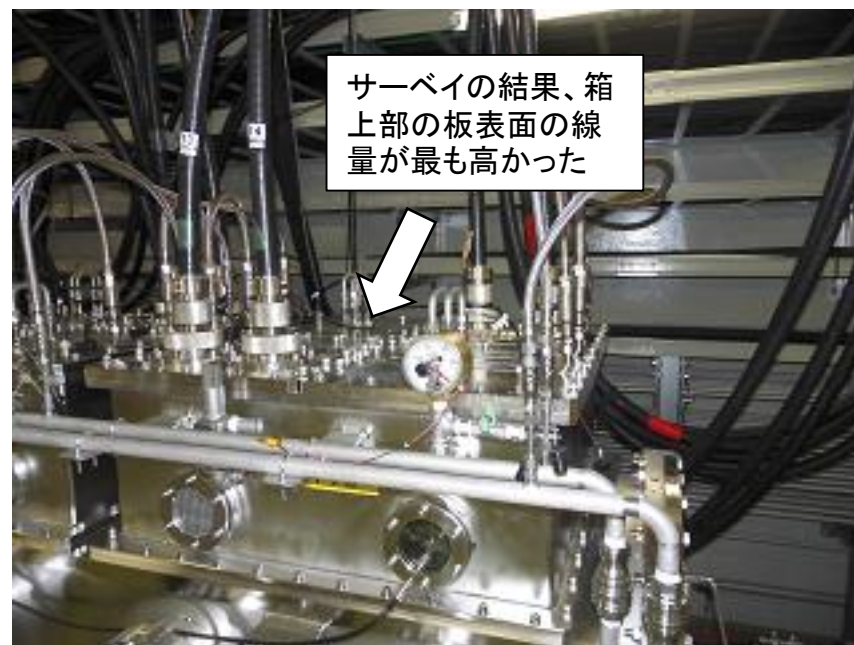
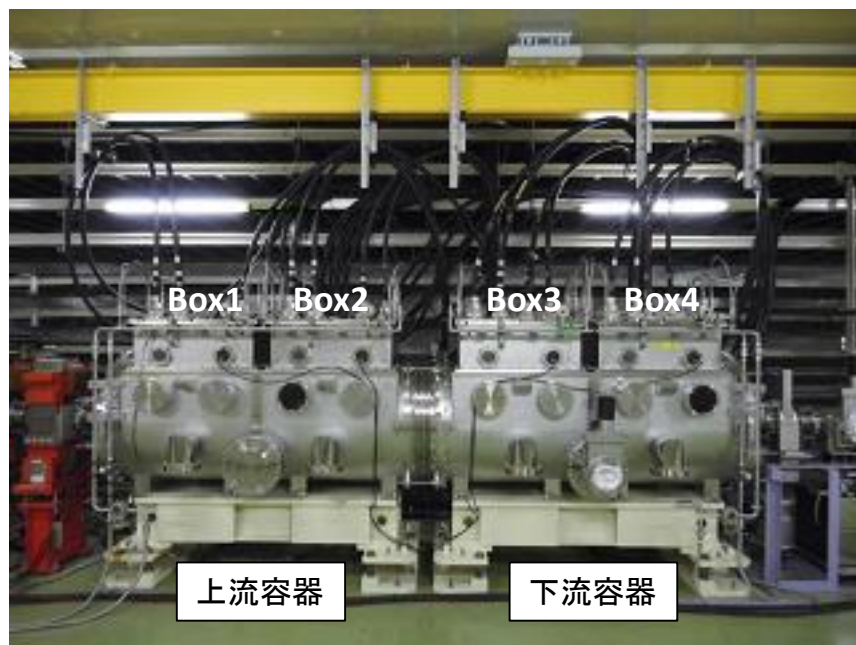
2013/01/30

表面: 200

30cm: 150 [$\mu\text{Sv/h}$] (上流容器)

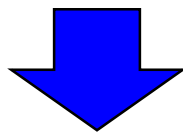
表面: 750

30cm: 700 [$\mu\text{Sv/h}$] (下流容器)



入射キッカー放射化への対応

- 2012年のMRコリメータシステムの変更以降、入射キッカーにおいて想定していなかった放射化が確認された。これはキッカーの保守作業を行う際に作業者の被曝線量を増加させ、**作業時間に大きな制約をもたらすもの**となった
- 散乱体 Col-1 を吸収体 Col-A, B に置き換えた際、後方散乱する中性子についても検討したが、四極電磁石QFR006が遮蔽となり、入射キッカーへの影響は小さいと考えていた
- 入射キッカーの真空容器をサーベイした結果、放射化が起こっているのは真空容器の上部であり、Boxの上板(Plate)において顕著であることが判明した
- Plateの放射化は、コリメータに近い下流側で大きい
- 残留放射線量状況から、キッカー真空容器を放射化しているのは上面から降ってくる中性子と推定した。この中性子束の流れは後に示すように、Col-Aから後方上部に放射された中性子が天井で反射され、丁度入射キッカー位置に跳ね返ってきたものである



中性子束の流れを堰き止めるためには、遮蔽体を設置するのが有効である

The background features a central white circle. Surrounding it are several green, fan-like shapes that radiate outwards, resembling a stylized sun or a fan. A single blue oval is positioned above the central circle.

中性子遮蔽体の検討

3 GeV陽子ビームに対する評価

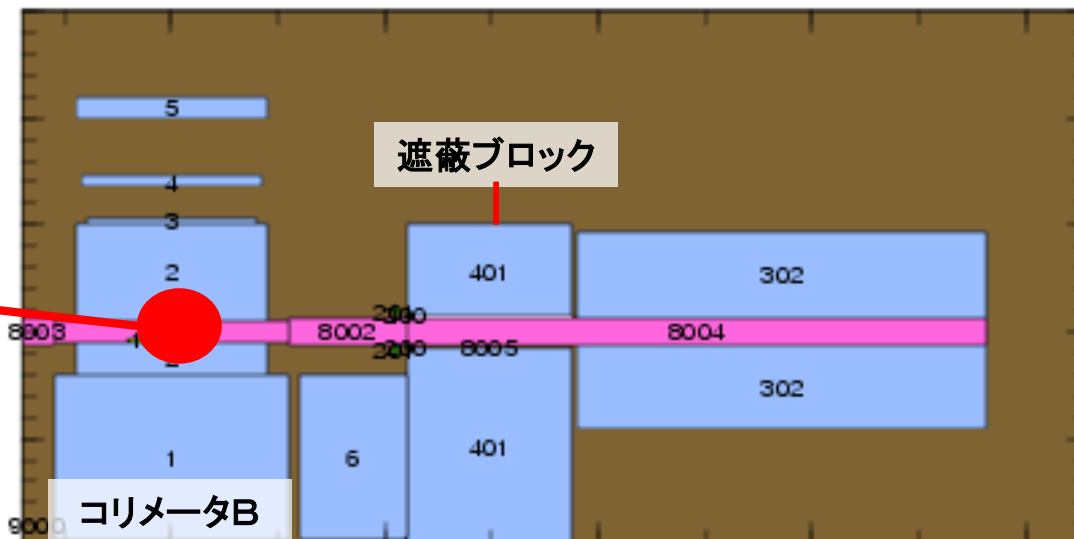
放射化の状況は条件によって様々であるが、3 GeVの陽子ビームがTaまたはWに衝突して発生する中性子による放射化については、これまでも機器保護用の遮蔽体設計のために検討してきた

これはコリメータ下流の四極電磁石を保護する遮蔽体の検討を行った際のもの

(条件値)

- コリメータ : 短尺型(コリメータB部)
- JAW長さ : 300mm(上流200mm,下流100mm)
- 遮蔽ブロック : 780mm(単体)
390mm+390mm(複合体),260mm+520mm(複合体),520mm+260mm(複合体)
- 遮蔽材 : 鉄、鉛、コンクリート、ポリエチレン
- 四極電磁石 : 端板を含め、円柱で近似
- フランジ : 花形円盤(φ240)とφ160フランジを円板で近似

二次中性子発生源

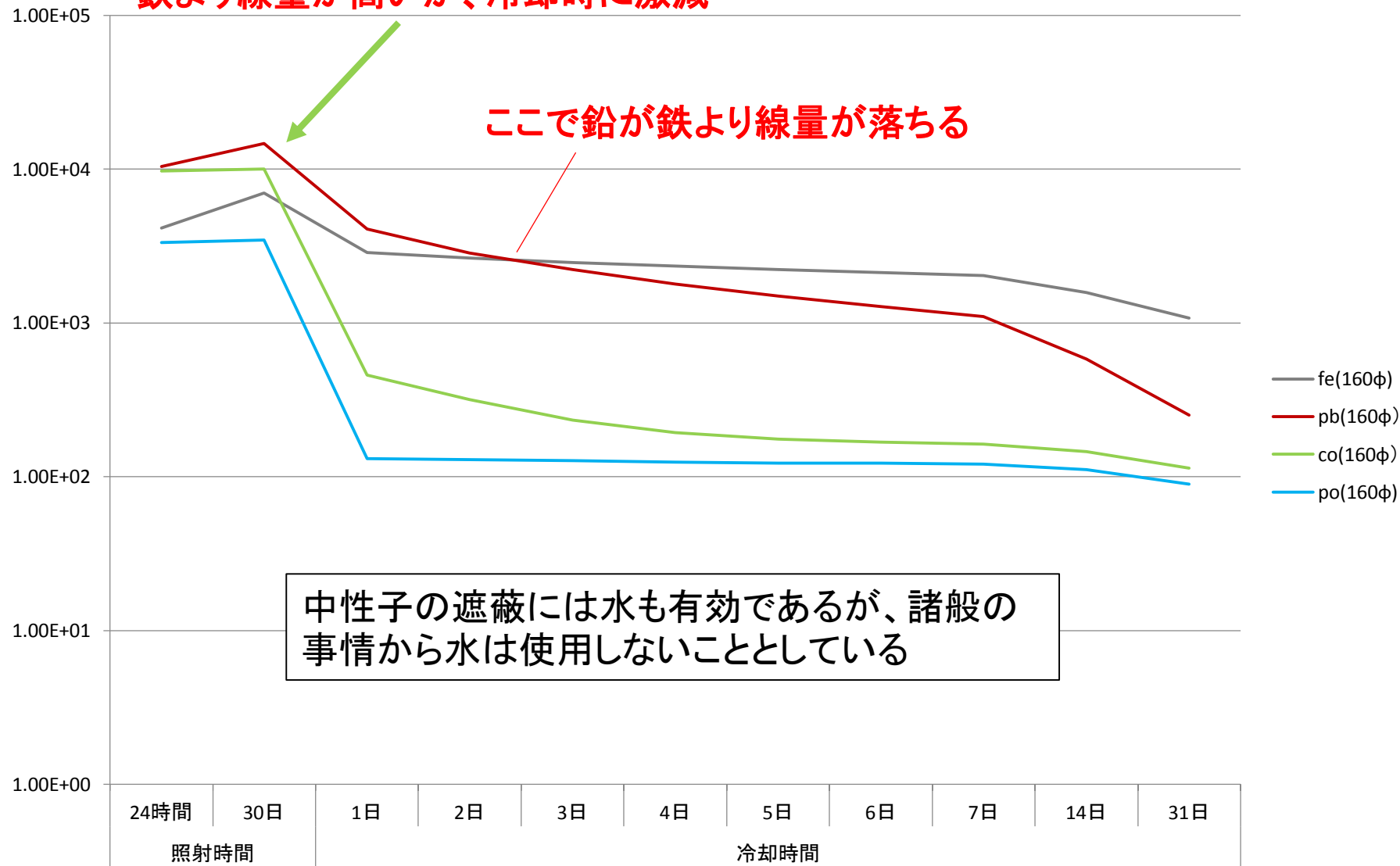


性質のまとめ

材質	遮蔽効率	放射化の影響	主な放射化生成物
鉄	2位	ビーム運転時はポリエチレンの次に線量が低い、冷却時に下降し、その後はほぼ一定	Cr51 Mn54 Fe55 V48 V49 Co56 Sc46 Mn52 Ar37 P33 S35 Be7 P32 Ca45 H3 Na22 Sc47 Sc44 Ti44 Ar39 Si32 Sc48 Mn53 Ca41 C14 Cl36 Al26 Be10その他57種類は冷却時に消滅
鉛	1位	ビーム運転時は他の材質に比べ線量は最も高い 冷却時は右肩下がり、3日後に鉄よりも下がる。	Tl202,Au195,Ir187,Hg203,Ir186m,Ir189m,Hf175,Ta178,W178,Bi205,Os185,Re183,Yb169,Tl204,W181,H3,Nb95,Rh103m,Sr89,Zr95,Eu147,Tm167,Er165,Ru103,Dy159,Lu171,Yb171m,Gd151,Pb205m,Xe127,Rb86,Os189m,Te121,Eu146,Sr85,Gd153,Bi206,Gd146,Lu173,Eu149,Be7 その他119種類 その他331種類は冷却時に消滅
コンクリート	3位	ビーム運転時は鉛の次に線量が高く、冷却時に下降し、その後はやや右肩下がり	Be7 Ar37 Cr51 Na22 H3 Mn54 Fe55 P33 V48 P32 S35 V49 K40 C14 Mn52 Ar39 Al26 Cl36 Be10 Mn53 その他64種類は冷却時に消滅
ポリエチレン	4位	ビーム運転時他の材質に比べ最も低い、冷却時に下降し、その後はほぼ一定	Be7 H3 Be10 その他12種類は冷却時に消滅

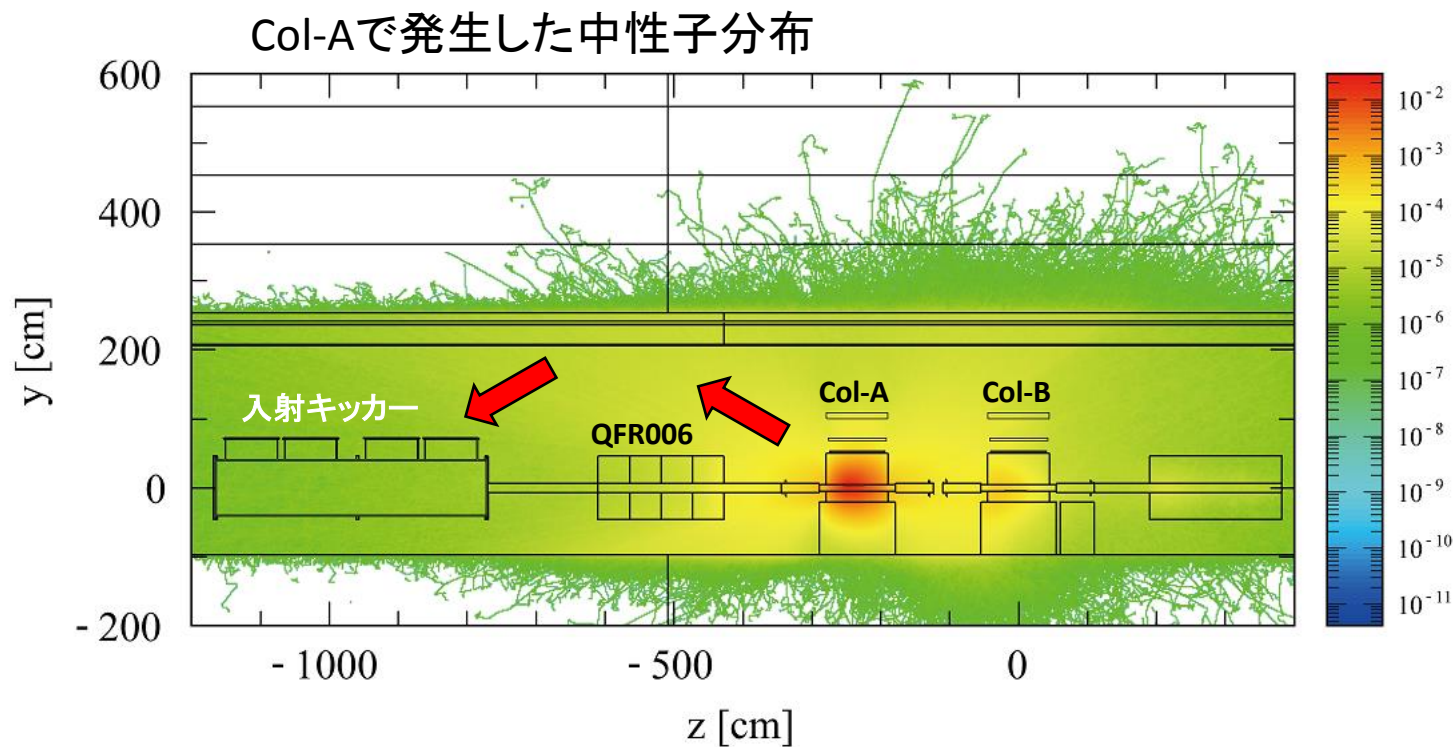
材質による放射化と減衰の違い

鉄より線量が高いが、冷却時に激減



遮蔽体に求められる仕様

- 入射キッカーを放射化しているのは、天井で反射してキッカー上部から降り注いでくる中性子である。左右および床方向からの回り込みは少ない(天井のテルハレルは鉄のため、中性子をよく反射する。これの有り無しで、7%ほどの寄与がある)
- 天井で反射する流路を断てばよいが、上方のみを塞ぐと堰き止められた分がQFR006に当たるので、QFR006も保護するためQFR006—Col-A間に壁状に設置する
- 現場での扱いやすさと自身の放射化を極力抑えるという観点から、遮蔽体にはポリエチレンを採用し、フレームはアルミとする



The image features a central white circle containing the text '遮蔽の効果'. This circle is surrounded by several large, light green, fan-shaped segments that radiate outwards, resembling a stylized sun or a fan. A single, light blue oval shape is positioned above the central circle. The overall composition is clean and modern, with a focus on geometric shapes and a limited color palette of green, blue, and white.

遮蔽の効果

遮蔽効果 1

- 遮蔽体の幅は、120 cmとした。これ以上大きくしても効果は上がらない
- 遮蔽体の高さは160~240 cmで検討し、200 cmとした

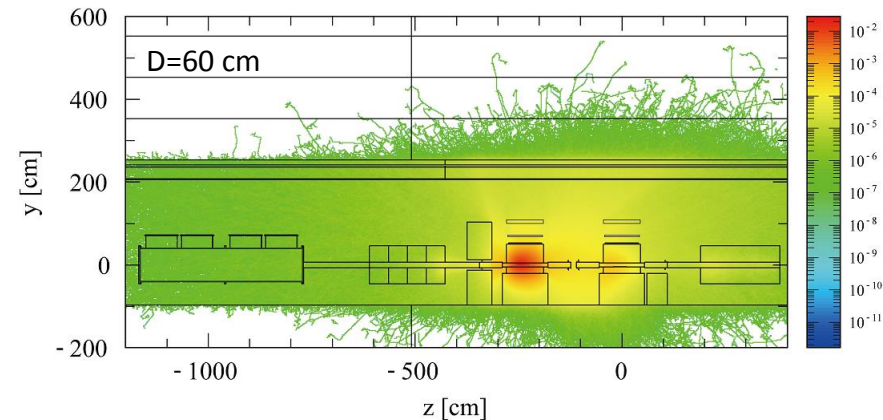
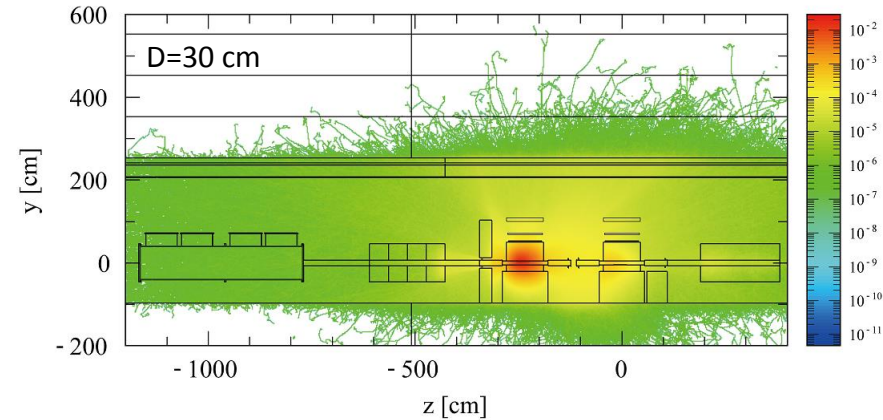
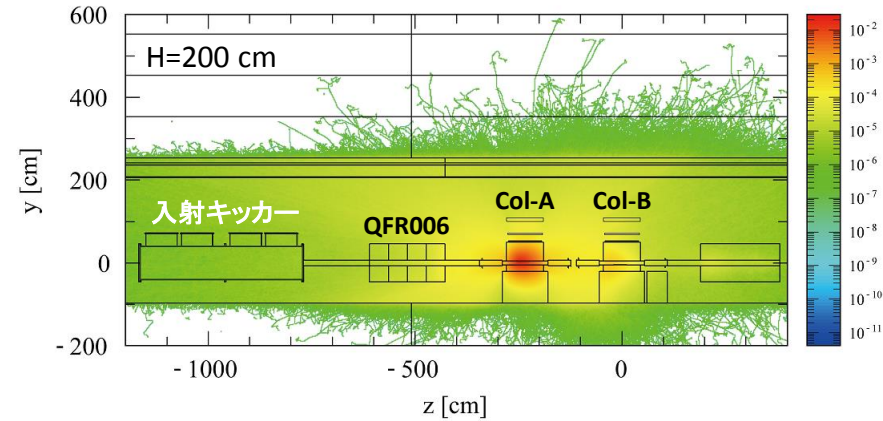
■ QFR006下流部およびキッカー真空容器上面のPlate, Box位置で評価を行い、中性子束の減衰を以下の通り確認した

幅:120 cm 高さ:200 cm の場合

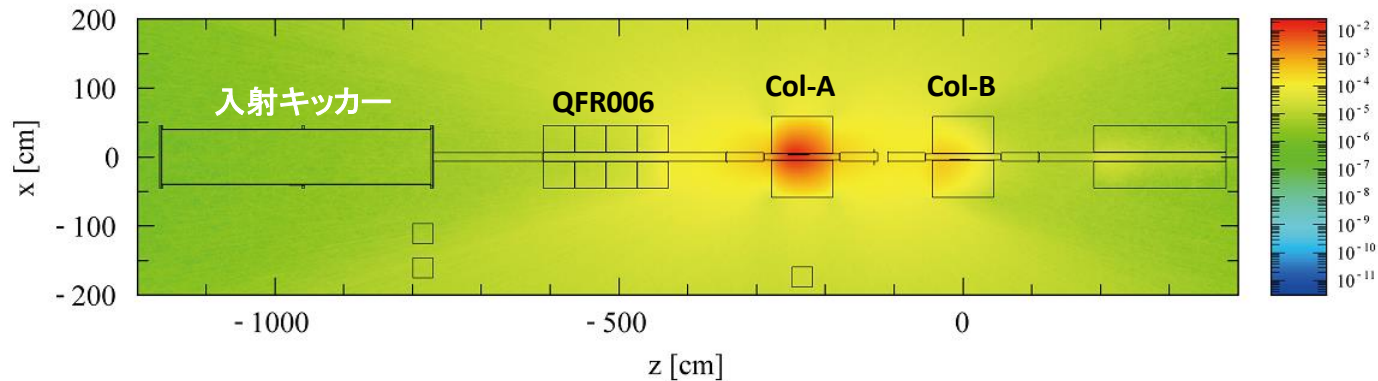
厚さ:	30 cm	60 cm
QFR006	0.51	0.34
Plate4	0.23	0.23
Plate3	0.37	0.20
Plate2	0.32	0.28
Plate1	0.22	0.23

(遮蔽体が無い時からの比)

- 遮蔽体を厚くすることは、後方散乱された中性子が直接衝突するQFR006を保護する際には効果的である
- キッカー容器の放射化を防ぐには、30 cm以上あればよいが50 cmほどが適当と考える



遮蔽効果 2 (中性子のzx方向分布)



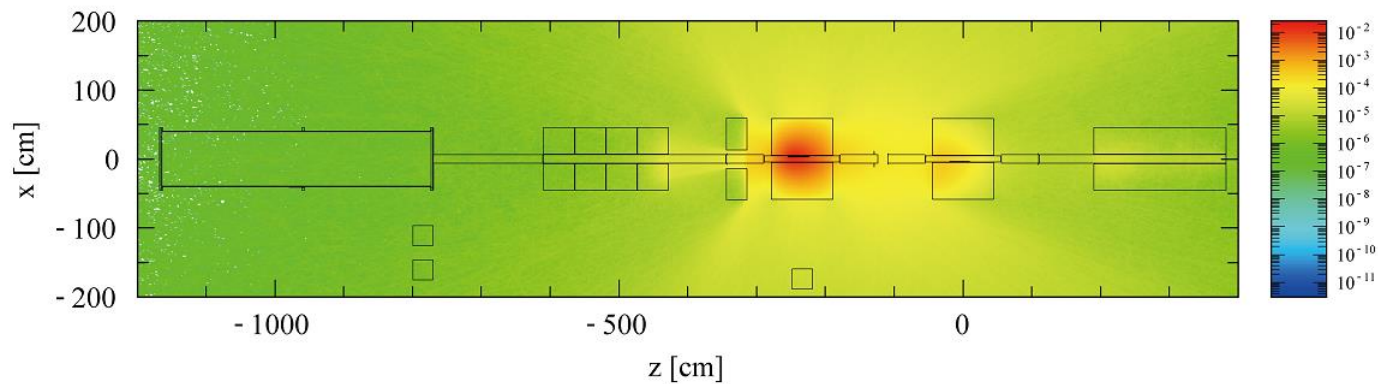
遮蔽体幅: $W = 120 \text{ cm}$

遮蔽体高さ: $H = 200 \text{ cm}$

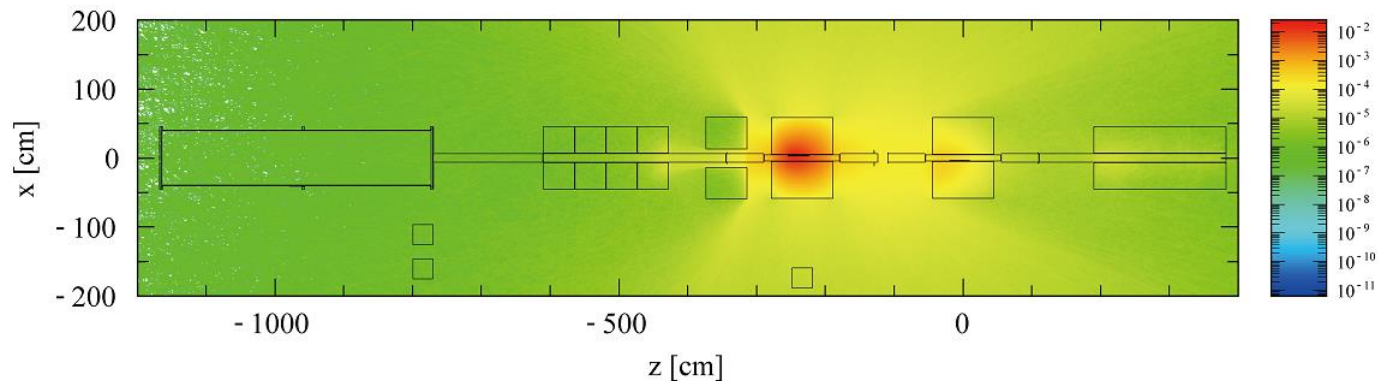
遮蔽体厚:

$D = 30 \text{ cm}$ (中段)

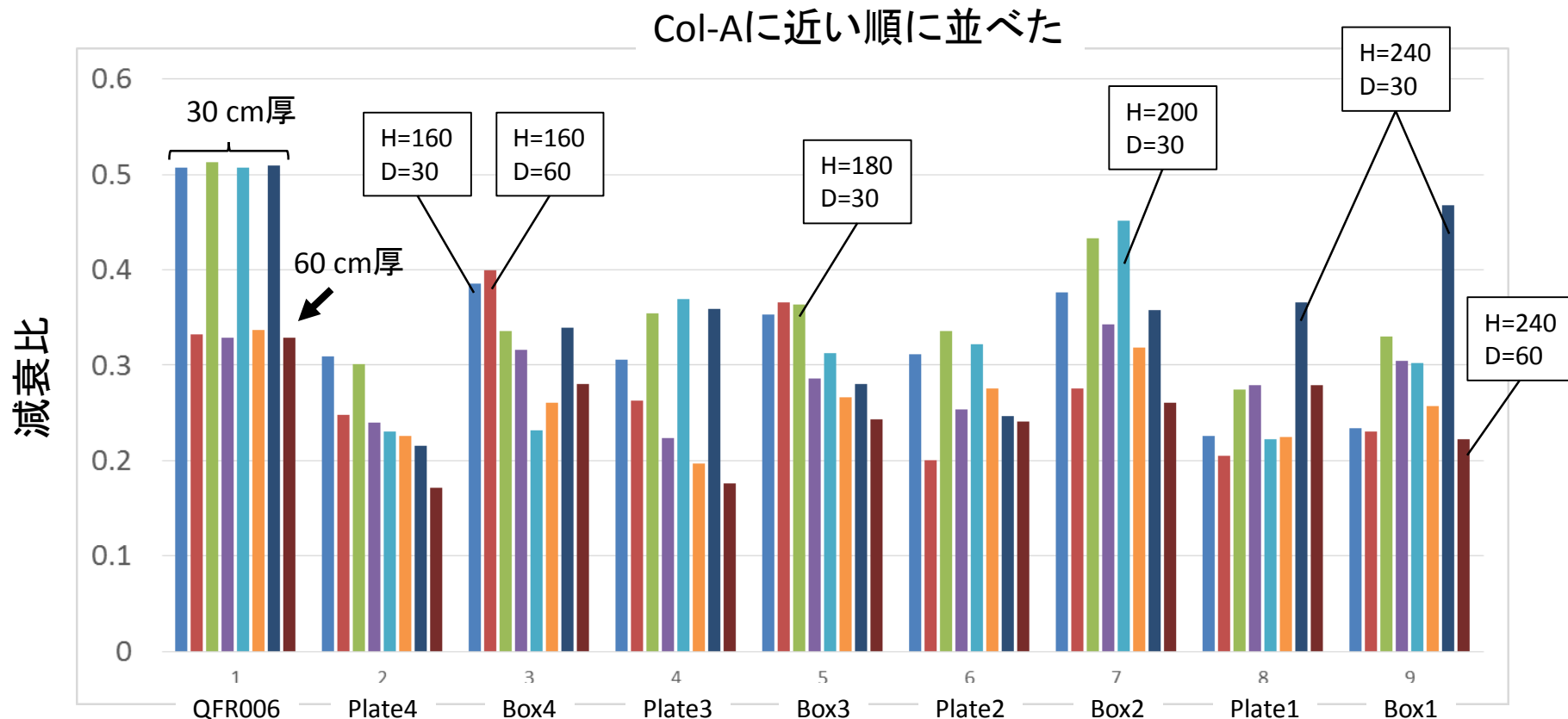
$D = 60 \text{ cm}$ (下段)



- 遮蔽体により、QFR006から上流で中性子による照射が、大きく減っているのが分かる
- 側面からの回り込みはもともと少ないので、遮蔽体の幅は120 cmあれば十分である



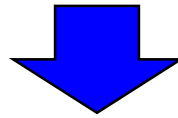
各条件下での遮蔽効果の比較



- QFR006はCol-A正面にあるので、照射量は形状に寄らず厚さのみで決まる
- 遮蔽体厚が30 cmの場合の振る舞いは、60 cm厚の場合に比べてやや複雑である
- 遮蔽体が高いほど減衰は大きくなるが、30 cm厚の場合にはCol-Aから遠い場所 (Box2以遠) でかえって線量が大きく増加する場合がある
- 遮蔽体高さは、200 cmくらいが適当である

まとめ

- 2012年のコリメータの入れ替え以降、入射キッカー周辺の残留線量が増加した
- 入射キッカー真空容器の放射化は上部のBox上のPlateがもっとも強く、真空容器上面から放射化していることが明らかとなった
- コリメータA上流部から後方散乱で出て来た中性子の流れのうち、QFR006との隙間から上部に放射されたものが天井で反射されて入射キッカーに降り注いでいた
- 天井以外の方向では、床や壁までの距離が近すぎたり遠すぎたりして、反射された中性子がキッカーに届かなかったり、あるいは拡散して放射化にあまり寄与していない



- QFR006とコリメータAの間に上部を塞ぐように遮蔽体を設置することを考えた
- 遮蔽体の材質には、放射化による残留線量が極めて少なく、軽量で取り扱いも容易なポリエチレンを採用する
- QFR006を保護するため、遮蔽体は床から高さ約2 mの壁型とした
- 新規遮蔽体を設置することで、入射キッカー上部のBox, Plateにおける中性子量を30 cm厚の遮蔽体でほぼ1/3、60 cm厚の遮蔽体で1/5にすることが出来ると見込まれる。ただし、30 cm厚では応答が不規則(厚さが足りない)と思われるため、遮蔽体厚には50 cm以上を推奨する