

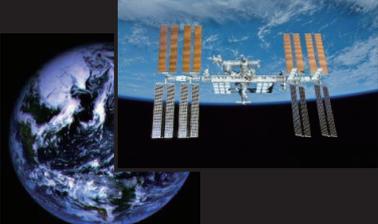
2017. 11. 8 (水)
 第 14 回宇宙環境シンポジウム
 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点
 コンベンションホール



銀河宇宙線に対する 遮蔽設計の確立に向けた検討

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
 ○後藤亜希, 島崎一紀
 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
 ○Goto, A. and Shimazaki, K.

次世代有人探査ミッション 



国際宇宙ステーション
(ISS)

次世代有人探査ミッション




月近傍 (シスルナ) ステーション 火星面探査
 月面探査

地磁気圏内 (地磁気遮蔽あり)

地磁気圏外 (地磁気遮蔽なし, 高線量率)

次世代ミッションにおいて宇宙飛行士の健康被害を防止するためには、
放射線防護技術の確立が必須

⇒ 本発表: 「銀河宇宙線 (GCR)」に対する遮蔽設計の確立

1/17

目次



1. 地磁気圏外における宇宙放射線環境
2. GCR 遮蔽の難しさ
3. 遮蔽設計確立に向けた PHITS による検討
 - ✓ 新規遮蔽材料
 - ✓ 既存遮蔽材料を用いた最適化
4. まとめ

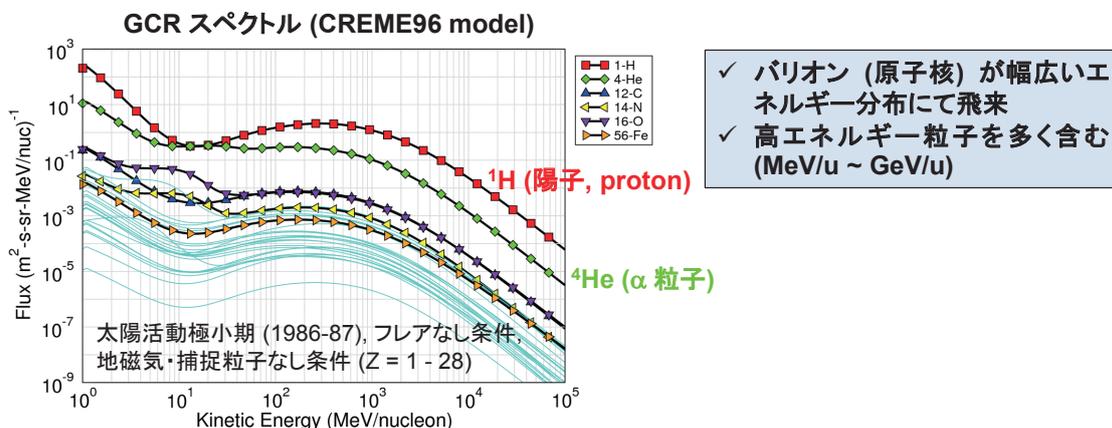
地磁気圏外における宇宙放射線環境



- 一次宇宙線 (宇宙に起源する放射線): **銀河宇宙線 (GCR)**, 太陽粒子線 (SEP)

銀河宇宙線 (GCR)

- 太陽系外より定期的に飛来する高エネルギー粒子
 - ✓ 粒子エネルギー: $\sim 10^{20}$ eV
- 98% バリオン (原子核), 2% 電子
 - ✓ バリオンは, 陽子 (~85%), α 粒子 (~14%), Li 以上の原子核 (~1%) からなる



Tylka, A. J. et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (1997), pp.2150-2160. 2/17

GCR 遮蔽の難しさ

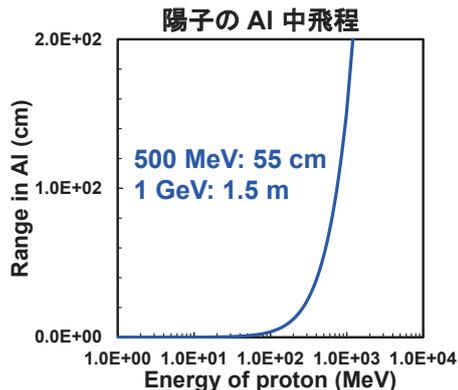


- GCR 遮蔽手段: **遮蔽材料の設置**
- 3 点の制限
 - 1) 高エネルギー粒子の遮蔽が困難 (物理的制限)
 - 2) 輸送重量の制限 (ミッション要求)
 - 3) 材料の制限 (化学的制限)

1) 高エネルギー粒子の遮蔽が困難

荷電粒子 (質量 m , 速度 v , 電荷 z) の阻止能
 (n : 物質の原子密度, Z : 物質の原子番号)

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{z^2 e^4}{mv^2} nZ$$



⇒ 高エネルギー粒子の“現実的な厚さの”物質による遮蔽は困難

NIST, PSTAR. 3/17

GCR 遮蔽の難しさ



- GCR 遮蔽手段: **遮蔽材料の設置**
- 3 点の制限
 - 1) 高エネルギー粒子の遮蔽が困難 (物理的制限)
 - 2) 輸送重量の制限 (ミッション要求)
 - 3) 材料の制限 (化学的制限)

2), 3) 輸送重量／材料の制限

- ロケットの輸送能力には限界あるため, **単位質量あたり遮蔽効果の高い材料**が要求
- 宇宙放射線遮蔽: 原子番号 (Z) の小さい元素が有効; 水素 ($Z = 1$) が最も有効

水素 (^1H)

- ✓ 電荷質量比 (Z/A) が最大
⇒ 静電相互作用による荷電粒子の遮蔽に有効
- ✓ 原子核質量が中性子質量と同程度, 自身は中性子持たない
⇒ 弾性散乱による二次中性子の減速に有効, 中性子ビルドアップの抑制

ポリエチレン (PE, $(\text{CH}_2)_n$): 水素重量濃度 14 wt%

PE より単位質量あたり遮蔽効果の高い材料の報告なし

4/17

GCR 防護の必要性



- ISS ミッションでは、被ばく線量制限値を設定することで被ばく管理を行っている

JAXA が定める ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値*

宇宙初飛行の年齢	男性 (mSv)	女性 (mSv)
27-30	600	500
31-35	700	600
36-40	800	650
41-45	900	750
≥ 46	1000	800

JAXA 規定: 国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士放射線被曝管理規定
(2013. 6. 26 改正)

* 寄与がん死亡率が 3% 超えないよう設定

次世代 (地磁気圏外) ミッション: 高線量率環境かつ長期間 (数百~ 1, 000 日間)

⇒ 1 回のミッション参加にて、
被ばく線量が制限値を超える (健康被害リスクが高くなる) 可能性がある
(深宇宙における GCR により, > 1 mSv/day となる可能性あり)

⇒ 放射線防護技術の確立が必要不可欠

5/17

目次



1. 地磁気圏外における宇宙放射線環境
2. GCR 遮蔽の難しさ
3. 遮蔽設計確立に向けた PHITS による検討
 - ✓ 新規遮蔽材料
 - ✓ 既存遮蔽材料を用いた最適化
4. まとめ

[本検討] 遮蔽設計確立に向けた検討



将来有人探査ミッション実現に向けた
GCR に対する「効果的な遮蔽設計」の確立



Particles and Heavy Ion Transport Code System: PHITS*
放射線輸送コードを使用した計算機シミュレーションによる検討

*PHITS: 日本原子力研究開発機構 (JAEA), 高度情報科学技術研究機構 (RIST), 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 他複数の機関が共同で開発を行っている, 粒子重イオン輸送計算汎用モンテカルロコード

T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 2013. 6/17

[検討 1] 新規遮蔽材料の適用可能性



- 水素貯蔵材料: 水素エネルギー輸送に使用される
- PE より水素重量濃度の高い水素貯蔵材料: **軽量かつ効果的な GCR 遮蔽材料**になり得るか?

水素貯蔵材料の水素重量濃度・密度

水素貯蔵材料 (室温大気圧下: 固体)	組成	水素重量濃度 [wt%]	密度 [g/cm ³]
アンモニアボラン	NH ₃ BH ₃	20	0.78
水素化ホウ素リチウム	LiBH ₄	19	0.67
(参考) ポリエチレン (PE)	(CH ₂) _n	14	0.90

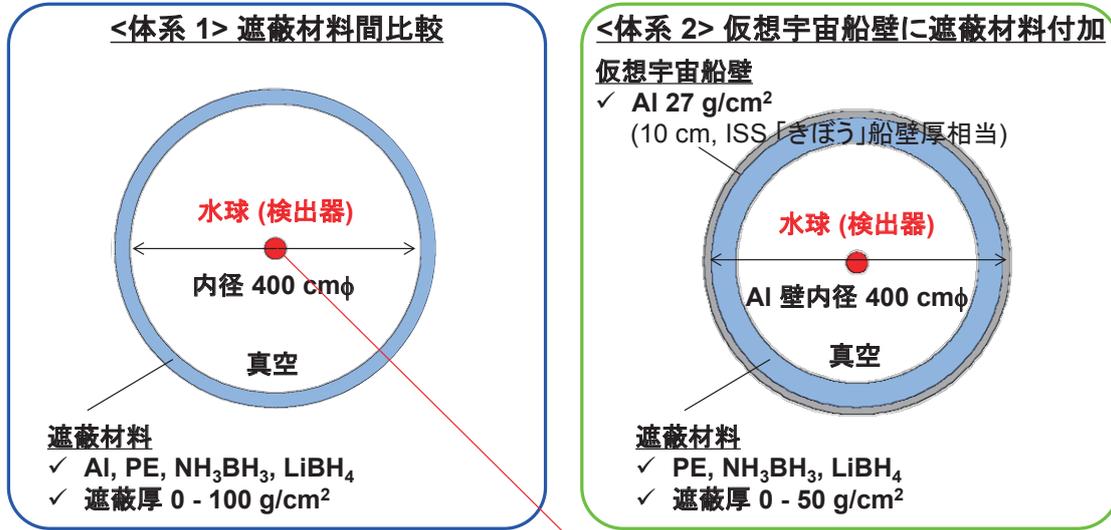
⇒ PHITS を用いた放射線輸送計算 (計算機シミュレーション) にて,
NH₃BH₃, LiBH₄ の GCR に対する遮蔽効果を調査



[検討 1] 新規遮蔽材料の適用可能性

計算条件: 線源・体系

- 実宇宙環境に近い「等方線源-球殻体系」モデルにて計算実施
- PHITS ver. 2.87/3.00 使用
- JAXA スーパーコンピュータプレポストシステム (SORA-PP): 並列化計算 (11 or 23 コア)



水球 (30 cmφ) の線量当量 [Sv]* をモンテカルロシミュレーションにて算出

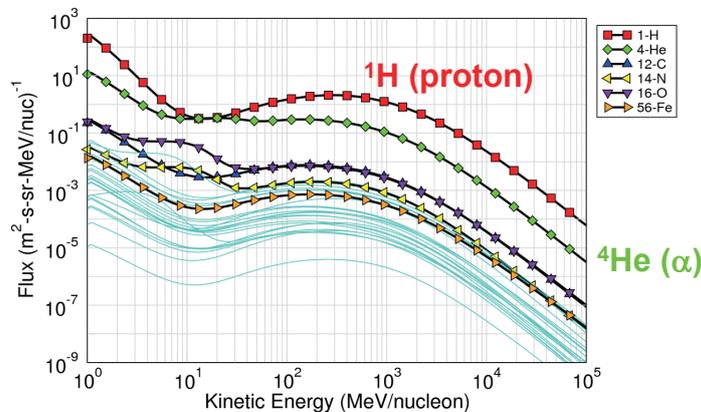
* 吸収線量 [Gy] (J/kg) に ICRP 60 にて定義された放射線加重係数 Q(L) を乗じた値 8/17

[検討 1] 新規遮蔽材料の適用可能性



計算条件: GCR 線源モデル

- CREME96 モデル
- Z: 1 ~ 28 (H ~ Ni)
- 太陽活動: **太陽活動極小期 (フレアなしモデル), 1986 ~ 1987**
- 軌道: 地球近傍惑星間 (地磁気なし, 捕捉粒子なし)



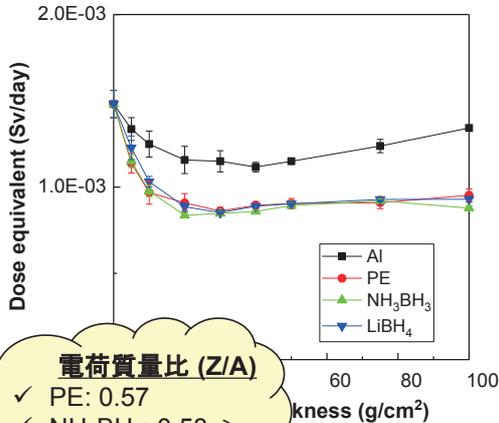
Tylka, A. J. et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (1997), pp.2150-2160. 9/17

[検討 1] 新規遮蔽材料の適用可能性



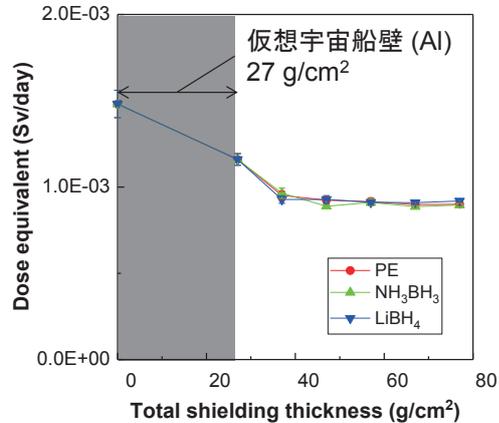
計算結果: GCR 線源照射による水球の線量当量*

<体系 1> 遮蔽材料間比較



電荷質量比 (Z/A)
 ✓ PE: 0.57
 ✓ NH₃BH₃: 0.58
 ✓ LiBH₄: 0.55

<体系 2> 仮想宇宙船壁に遮蔽材料付加



(* 統計誤差: σ (標準偏差) / \bar{x} (平均) ≤ 0.1)

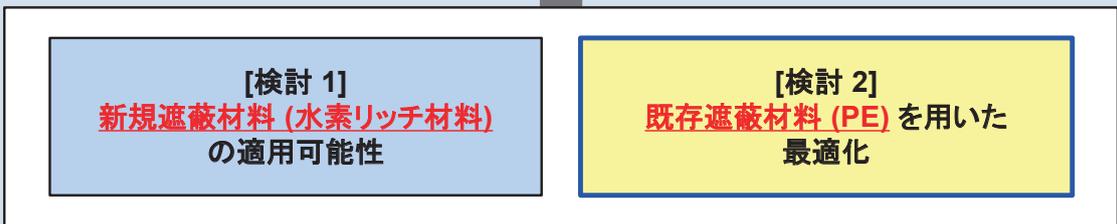
(既存の固体材料の中で最も水素重量濃度が高い) 水素貯蔵材料の宇宙放射線に対する遮蔽効果は **PE と同程度であり、新規遮蔽材料候補として適切でない**
 ⇒ 遮蔽材料の組成改良: 軽量かつ効果的な遮蔽に対する解ではない

10/17

[本検討] 遮蔽設計確立に向けた検討



将来有人探査ミッション実現に向けた **GCR に対する「効果的な遮蔽設計」の確立**



Particles and Heavy Ion Transport Code System: PHITS*
 放射線輸送コードを使用した計算機シミュレーションによる検討

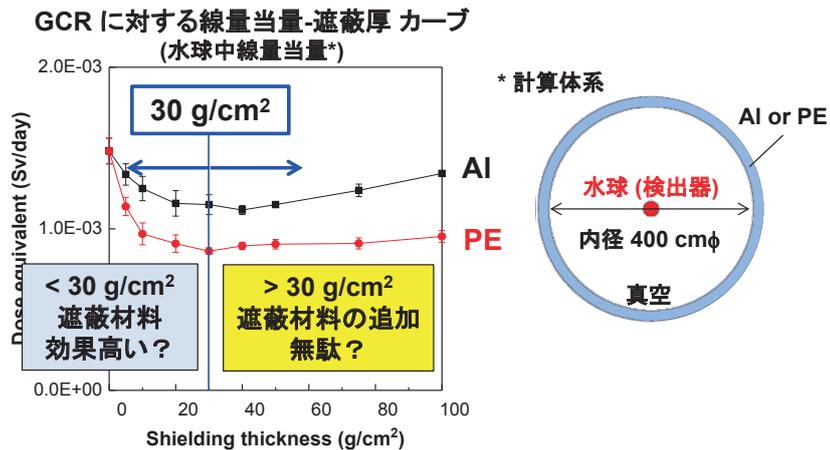
*PHITS: 日本原子力研究開発機構 (JAEA), 高度情報科学技術研究機構 (RIST), 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 他複数の機関が共同で開発を行っている, 粒子重イオン輸送計算汎用モンテカルロコード

[検討 2] 既存遮蔽材料 (PE) を用いた最適化



- GCR に対する線量当量-遮蔽厚カーブの傾向

- ✓ Al 球殻内の線量当量: 約 30 g/cm² にて極小, > 30 g/cm² にて遮蔽厚増大に伴い増大
⇒ 核破碎 (fragmentation) に伴う二次中性子の生成
- ✓ PE 球殻内の線量当量: 約 30 g/cm² 以降変化小さい
⇒ 水素が二次中性子を停止, 抑制



Ray-tracing による宇宙船の遮蔽環境解析
⇒ 適切な場所への最低限の PE 付加により, 船内の線量当量を最小化?

12/17

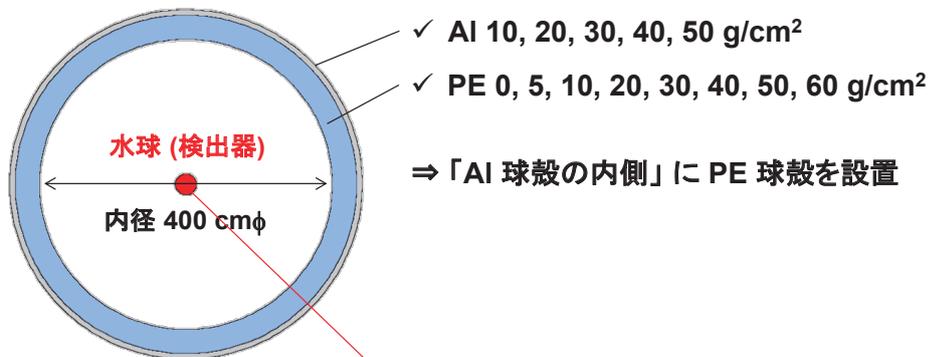
[検討 2] 既存遮蔽材料 (PE) を用いた最適化



計算条件: 線源・体系

Al/PE 2 層球殻の遮蔽効果を調査し, Al 厚 < 30 g/cm² or > 30 g/cm² にて, PE の遮蔽効果に差が生じるか検証

- 実宇宙環境に近い「等方線源-球殻体系」モデルにて計算実施
- PHITS ver. 3.00 使用
- JAXA スーパーコンピュータプレポストシステム (SORA-PP): 並列化計算 (11 コア)
- 線源: CREME 96 model (Solar Min), 等方線源



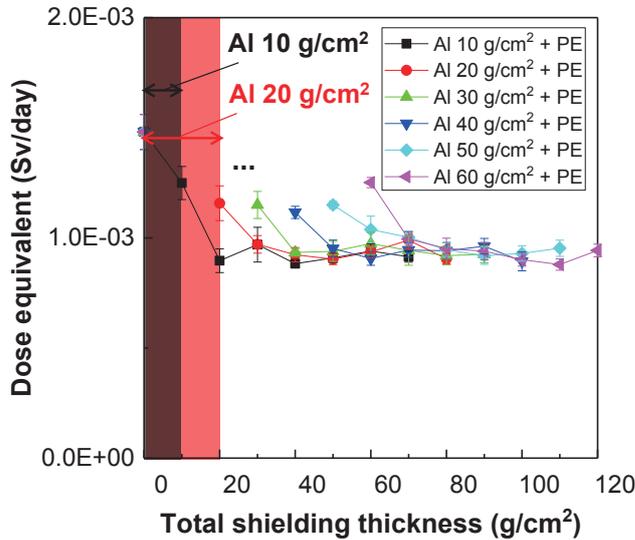
水球 (30 cmφ) の線量当量 [Sv] をモンテカルロシミュレーションにて算出

13/17

[検討 2] 既存遮蔽材料 (PE) を用いた最適化



計算結果: GCR 線源照射による水球の線量当量*



(* 統計誤差: σ (標準偏差) / \bar{x} (平均) ≤ 0.1)

✓ Al 壁厚 (> 30 g/cm² or < 30 g/cm²) に関わらず, 10 – 20 g/cm² の PE 付加により線量当量は最低値となる

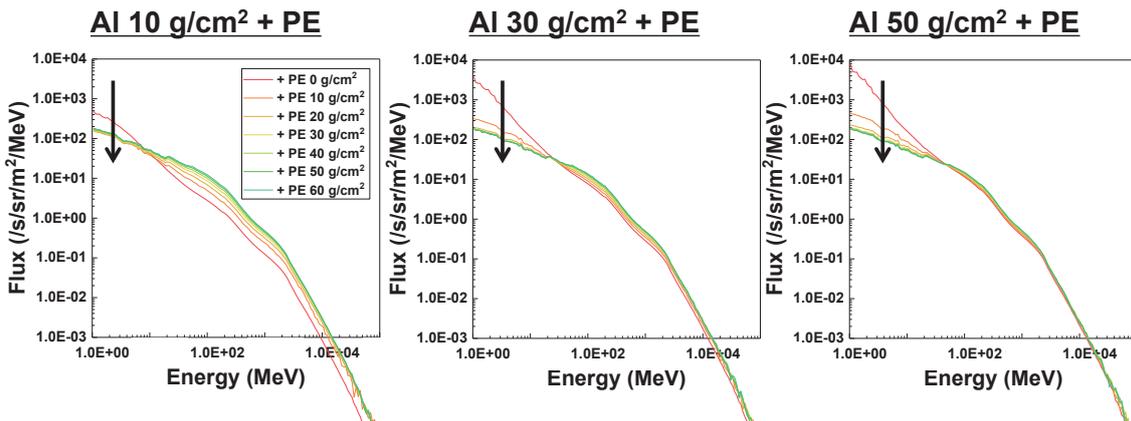
⇒ 10 – 20 g/cm² の PE 付加は線量当量低減に有効であり, それ以上の厚さは無駄

14/17

[検討 2] 既存遮蔽材料 (PE) を用いた最適化



計算結果: 球殻 Void 空間の中性子フラックス



✓ PE 10 – 20 g/cm² 付加: 数十 MeV 以下中性子低減

✓ PE > 20 g/cm² 付加: 数十 MeV 以下中性子数ほぼ変化なし

⇒ Al 球殻の内側に PE を10 – 20 g/cm² 付加すると, 数十 MeV 以下二次中性子量 (Al/PE 球殻での中性子生成量-停止量) が平衡に達する

15/17

[検討 2] 既存遮蔽材料 (PE) を用いた最適化



今後の課題

1. 実宇宙船に近い体系での PE の遮蔽効果傾向

- ✓ 円筒形状
- ✓ ISS「きぼう」、月近傍ステーション相当形状



ISS「きぼう」

2. 他の「線量」での PE の遮蔽効果傾向

- ✓ 被ばく管理に使用する実効線量当量 (effective dose equivalent)* などでの傾向
(* 放射線荷重係数, 組織荷重係数を加味した全身の線量)



次世代有人探査ミッションにて適用可能な 遮蔽設計の最適化

遮蔽材の設置量・設置位置の最適化, 宇宙服の適用, 等

16/17

目次



1. 地磁気圏外における宇宙放射線環境
2. GCR 遮蔽の難しさ
3. 遮蔽設計確立に向けた PHITS による検討
 - ✓ 新規遮蔽材料
 - ✓ 既存遮蔽材料を用いた最適化
4. まとめ

まとめ



- 次世代有人探査ミッションの安全な実現に向けて、GCR に対する効果的な遮蔽設計確立のため、PHITS コードを用いた以下検討を実施
 - ✓ 新規遮蔽材料 (水素リッチ材料) の適用可能性
 - ✓ 既存遮蔽材料 (PE) を使用した最適化
- 遮蔽材料の組成改良が、GCR の遮蔽効果に与える影響は小さく、**PE 設置以上に軽量かつ効果的な遮蔽は困難**
- AI 球殻 (仮想船壁) 内に PE を設置すると、**AI 厚に関わらず線量当量は低減するが、PE > 20 g/cm² の設置は無駄**
- 今後、宇宙船内の線量を最小化する遮蔽材の設置量、設置位置などについて、検討を進める

17/17