

太陽高エネルギー陽子イベント による宇宙線被ばく

佐藤達彦

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

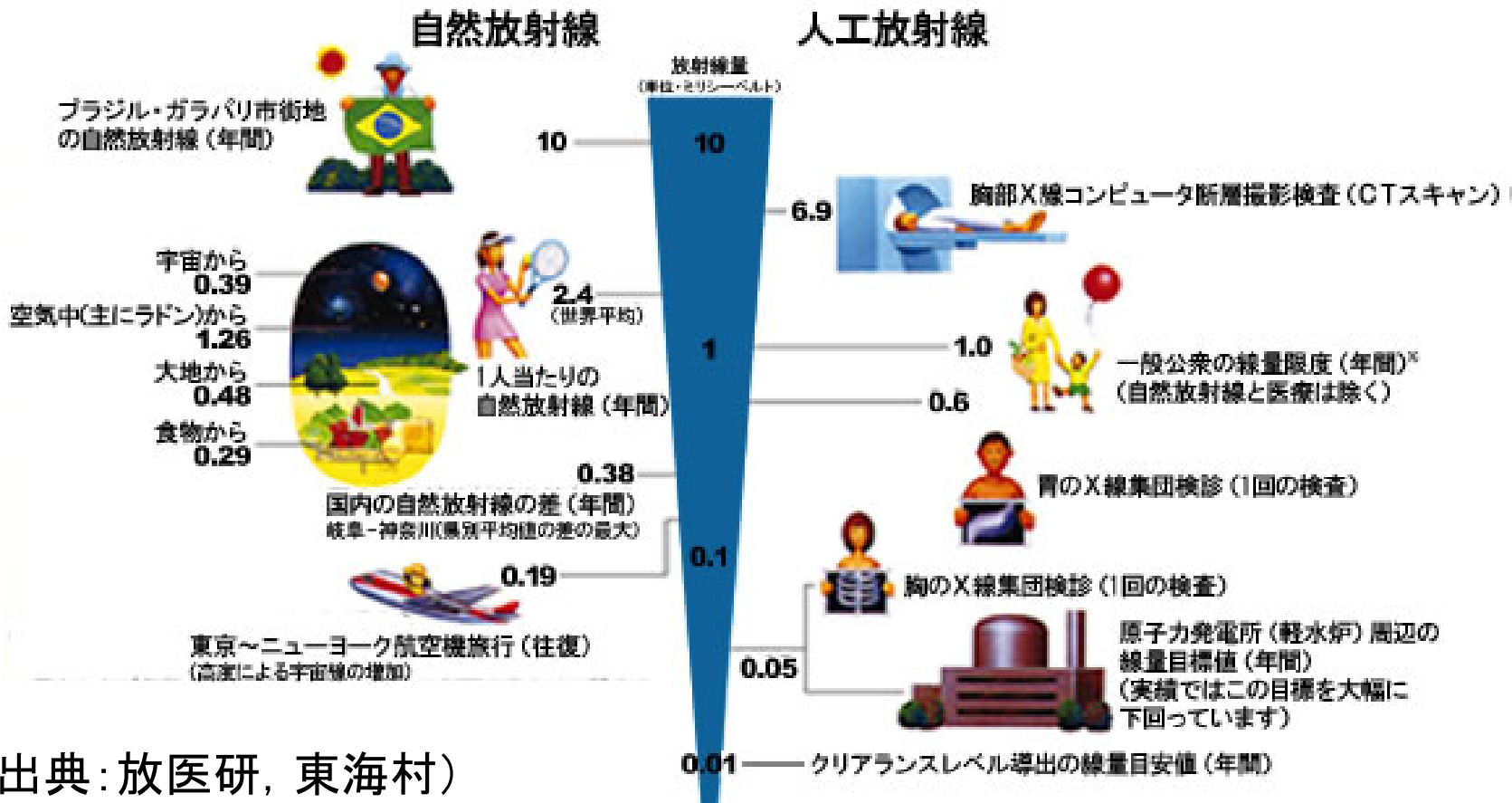
共同研究者 (順不同)

- ✓ WASAVIES開発
片岡龍峰 (極地研), 久保勇樹 (NICT), 塩田大幸 (名大),
八代誠司 (米国カトリック大学), 桑原孝夫 (デラウェア大学)
- ✓ JISCARD開発
保田浩志 (放医研)
- ✓ Virtualきぼうモジュール開発
永松愛子 (JAXA)
- ✓ PHITS開発
仁井田浩二 (RIST), 岩元洋介, 橋本慎太郎, 小川達彦, 古田琢哉,
安部晋一郎, 甲斐健師, 松田規宏 (以上JAEA), 岩瀬広 (KEK)

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. これまでの研究成果
 - ✓ 通常時の被ばく線量評価手法
 - ✓ SPE時の被ばく線量評価手法
3. まとめと今後の展望

日常生活における被ばく線量



(出典: 放医研, 東海村)

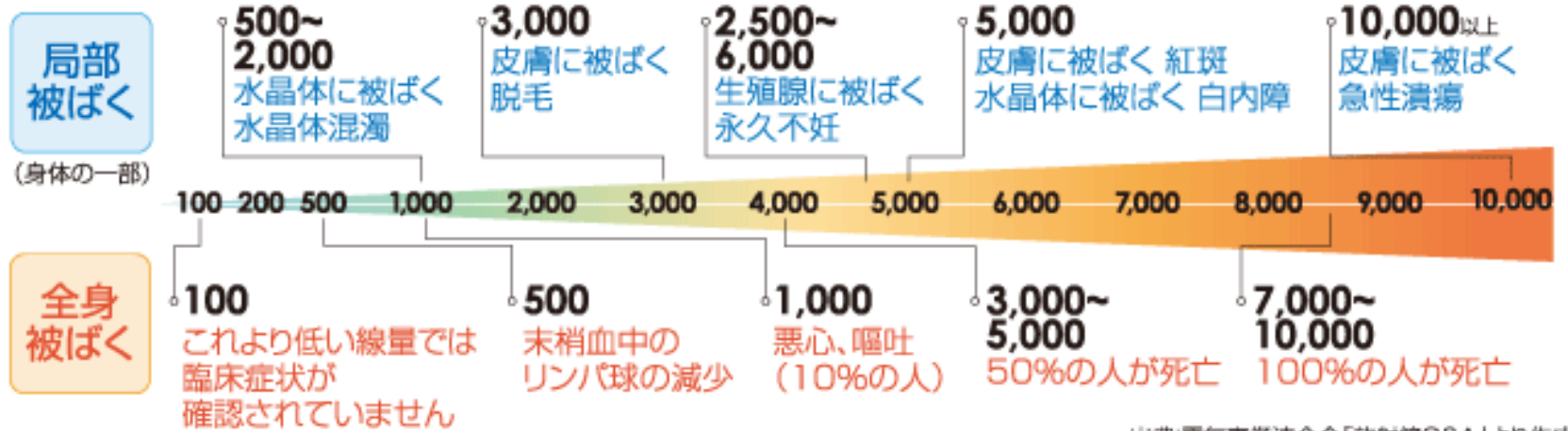
- ✓ 航空機乗務員の被ばく線量管理目標値は5mSv/年
- ✓ 宇宙飛行士の生涯被ばく線量限度値は500~1000mSv*

*性別・年齢に依存

被ばく線量と人体影響

【多量の放射線を一度に受けた場合の人体への影響】

数字は放射線を受けた量(単位:ミリシーベルト)



出典:電気事業連合会「放射線Q&A」より作成

被ばく線量(mSv)と人体影響の関係

(出典:電気事業連合会, 中部電力)

- ✓ 確定的影響: 500mSv程度から発生(リンパ球, 水晶体など)
- ✓ 確率的影響: 1Sv当たり5%程度の生涯死亡リスク上昇
(ただし100mSv以下では疫学データで有意差なし)

宇宙線被ばくの概要

通常時と太陽陽子イベント(SPE)時の宇宙線被ばく線量の概算値

被ばく形態	通常時	SPE時
宇宙飛行士 (船外活動中)	約1 mSv/day 銀河宇宙線, 捕捉陽子, 捕捉電子 (皮膚と水晶体のみ)	最大 数Sv 陽子(E>2MeV), 電子(E>1MeV) →確定的影響が生じる
宇宙飛行士 (ISS滞在中)	約0.5 mSv/day 銀河宇宙線, 捕捉陽子	最大 数100 mSv 陽子(E>100MeV)
航空機搭乗者	約 0.1 mSv/東京・NY往復 銀河宇宙線 (主に2次中性子)	最大 数 mSv 陽子(E>100MeV)
公衆 (極域・0km)	約 0.3 mSv/y 銀河宇宙線 (主に2次μ粒子)	最大 数 μSv 陽子(E>500MeV)

- ✓ 通常時: 線量限度値を急に超える心配はない → 事後評価
- ✓ SPE時: 線量限度値を急に超える可能性有り → 予測が重要

100MeV以上の陽子フラックスをイベント発生からできるだけ早く予測することが重要

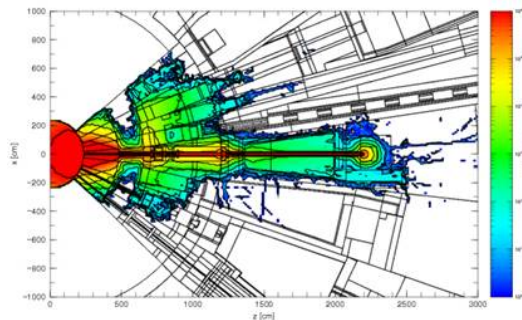
発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. これまでの研究成果
 - ✓ 通常時の被ばく線量評価手法
 - ✓ SPE時の被ばく線量評価手法
3. まとめと今後の展望

通常時における被ばく線量評価法

放射線挙動解析 モンテカルロコードPHITS

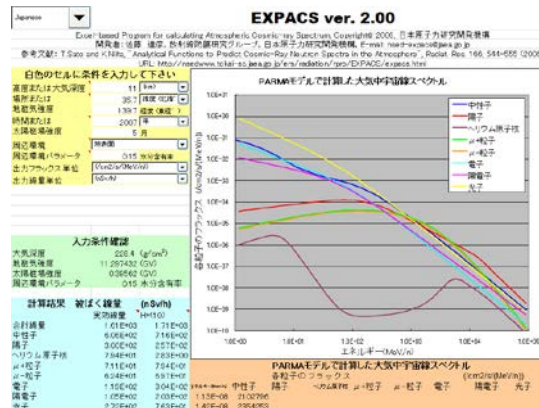
PHITS



Particle and Heavy Ion Transport Code System

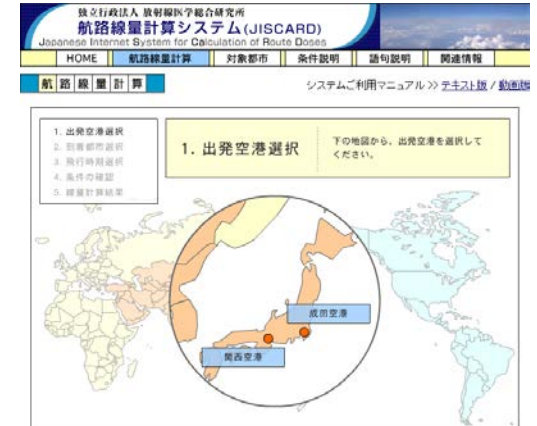
銀河宇宙線に対する空気
シャワーシミュレーション

大気圏内宇宙線スペク トル計算モデルEXPACS



緯度・経度・高度・年月日
から宇宙線フラックス導出

航路線量計算プログラム JISCARD



2 空港間の航路線量
を自動計算

- ✓ 放医研と航空会社が協力して各乗務員の被ばく線量を毎年算出
- ✓ 被ばく線量が管理目標値(5mSv/年)を下回っていることを確認

- ✓ PHITS <http://phits.jaea.go.jp/>
- ✓ EXPACS <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>
- ✓ JISCARD <http://www.jiscard.jp/>

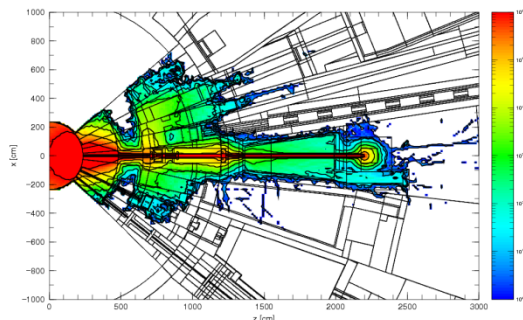
PHITSの概要

Particle and Heavy Ion Transport code System

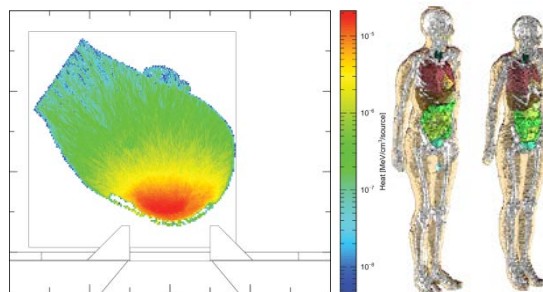
PHITSとは？

任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

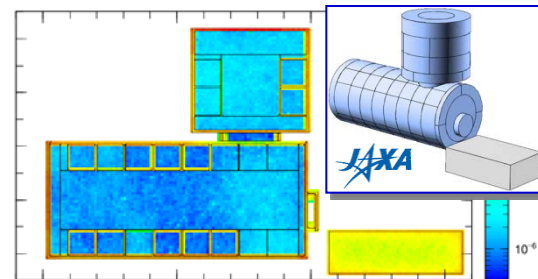
適用例



加速器遮へい設計



放射線防護・治療評価



宇宙・地球惑星科学

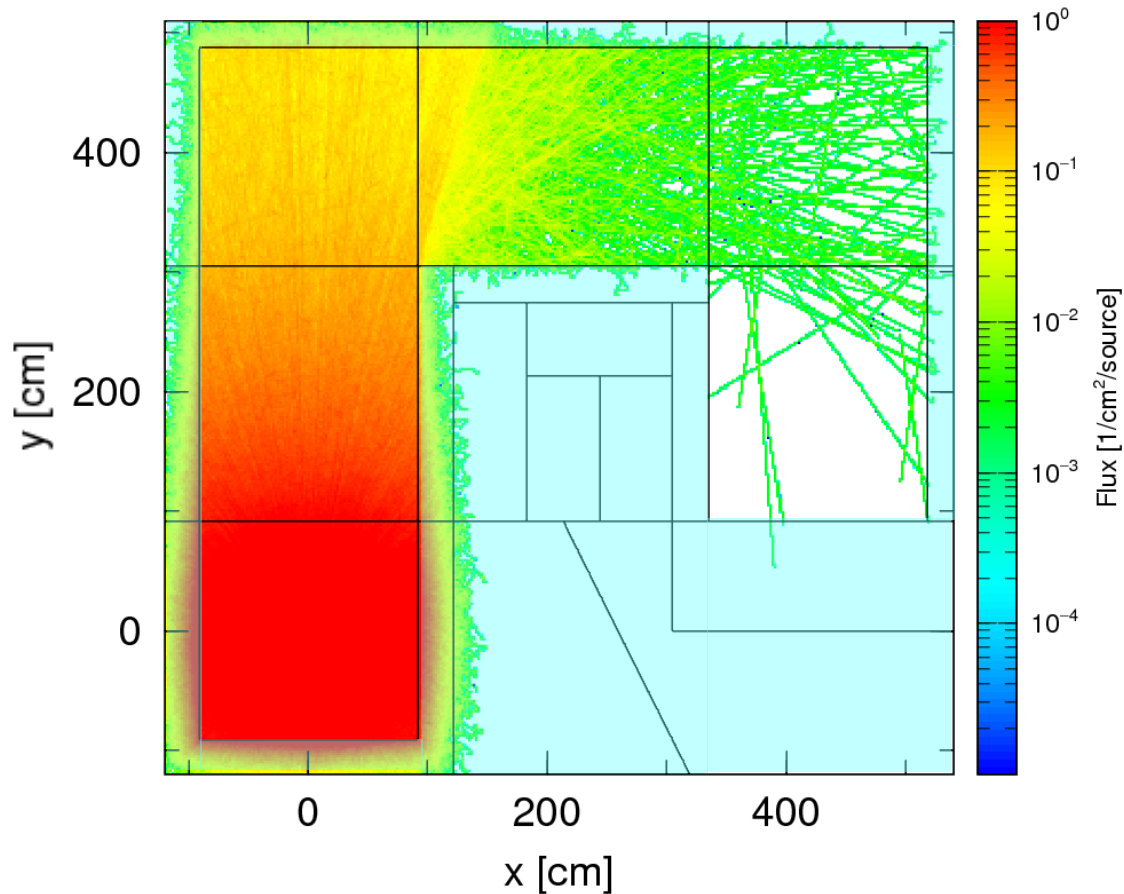
入手方法

- PHITS講習会に参加する → 定期講習会 (9/3~4@東海村) 申込受付中
- RISTの原子力コードセンターに依頼する (国内ユーザー, 手数料13,176円)
- OECD/NEA DatabankもしくはRSICCに依頼する (国外ユーザー)

国内外1,800名以上のユーザーが様々な目的で利用

PHITS計算結果の例

no. = 1, ie = 1, iz = 1, it = 1



^{137}Cs から放出された100,000個の光子の挙動を模擬

個々の放射線挙動を乱数を用いて模擬することにより、全体的な挙動(平均値)を導出

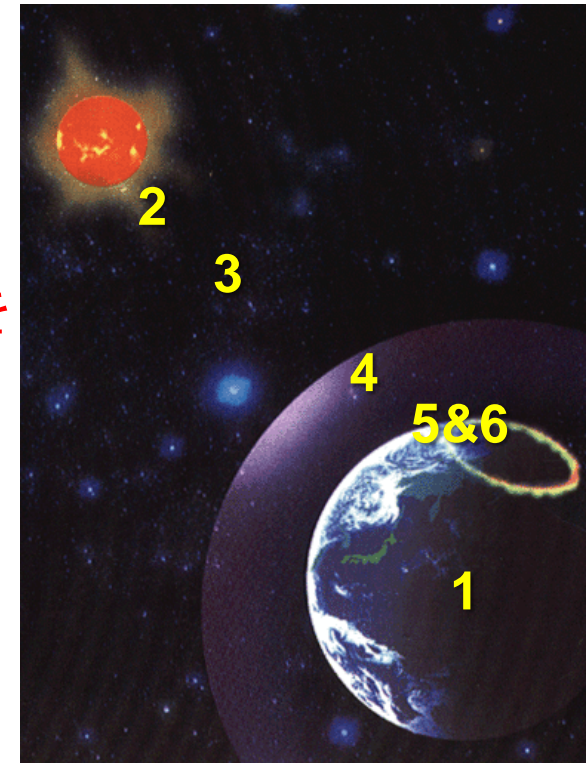
発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. これまでの研究成果
 - ✓ 通常時の被ばく線量評価手法
 - ✓ **SPE時の被ばく線量評価手法**
3. まとめと今後の展望

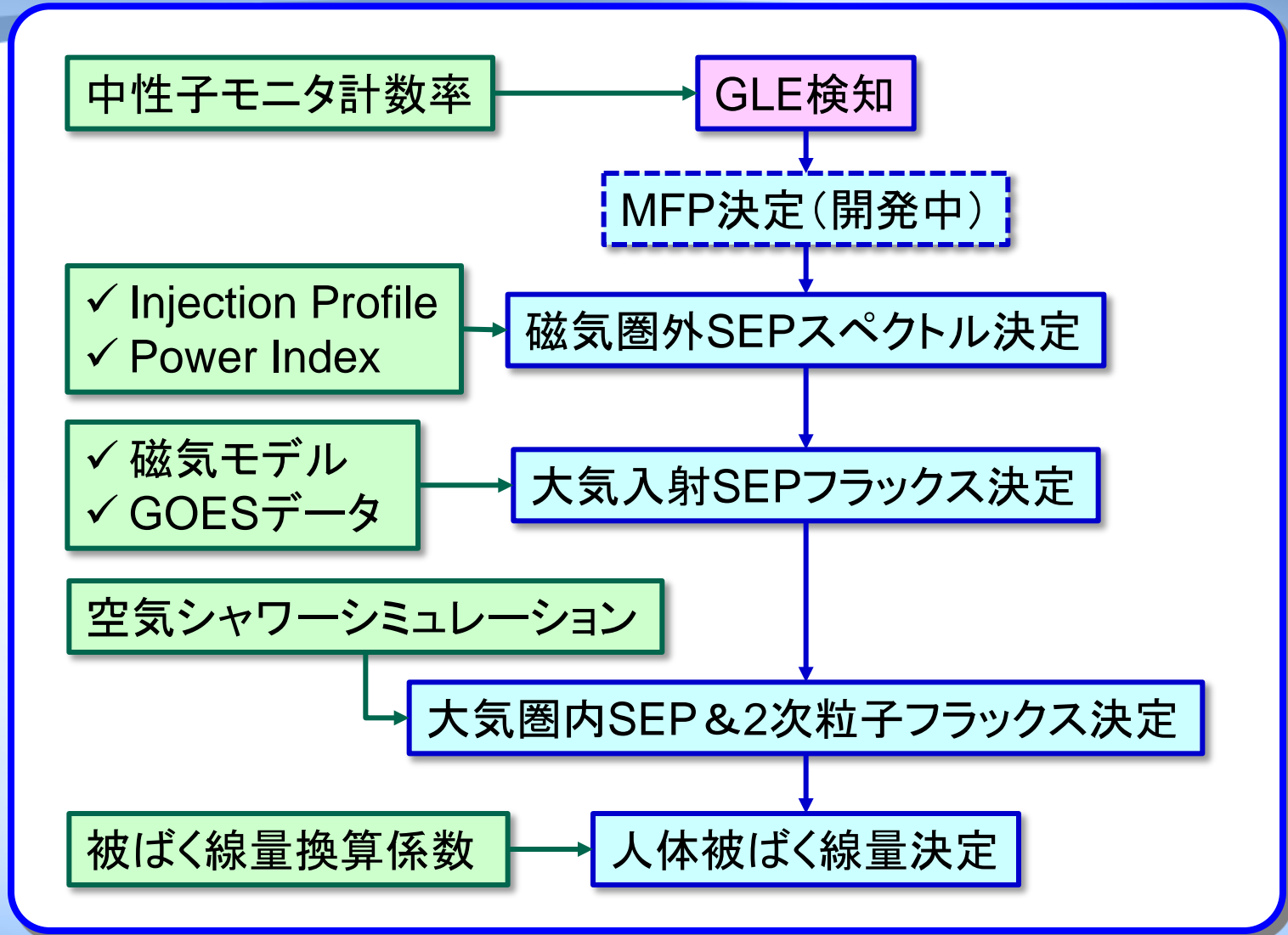
SPE時の航空機搭乗者被ばく線量評価

WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to SEP

1. 地上中性子モニタの計数率上昇からGround Level Enhancement (GLE)を検知 → Kuwabara et al.
2. 太陽風シミュレーションに基づいてSEPのmean free path (MFP) を決定 → Shiota et al. (予定)
3. MFPなどを入力パラメータとしてfocused transport equationを解き、磁気圏外側におけるSEPフラックスを推定 → Kubo et al.
4. 上記結果と磁気圏内粒子追跡モデルを用いて大気圏内に入射するSEPフラックスを計算 → Kataoka et al.
5. 上記結果とPHITSを用いて作った空気シャワーシミュレーションデータベースを用いて各航路上のSEP及びその2次粒子フラックスを決定 → Sato et al.
6. 決定したフラックスと人体への線量換算係数を組み合わせて航空機乗務員の被ばく線量を評価



WASAVIESフローチャート



GLEの検知

- ✓ 長期的な太陽活動の変動や、突発的なSEP事象を観測するため、数多くの地上中性子モニタが日常的に地表面における中性子強度を観測
- ✓ SPEにより地上中性子モニタの計数率が急激に上昇することをGLEと呼ぶ

リアルタイムでGLEを検出するアルゴリズム(桑原モデル)

中性子モニタの設置場所

Inuvik, Canada

Fort Smith, Canada

Peawanuck, Canada

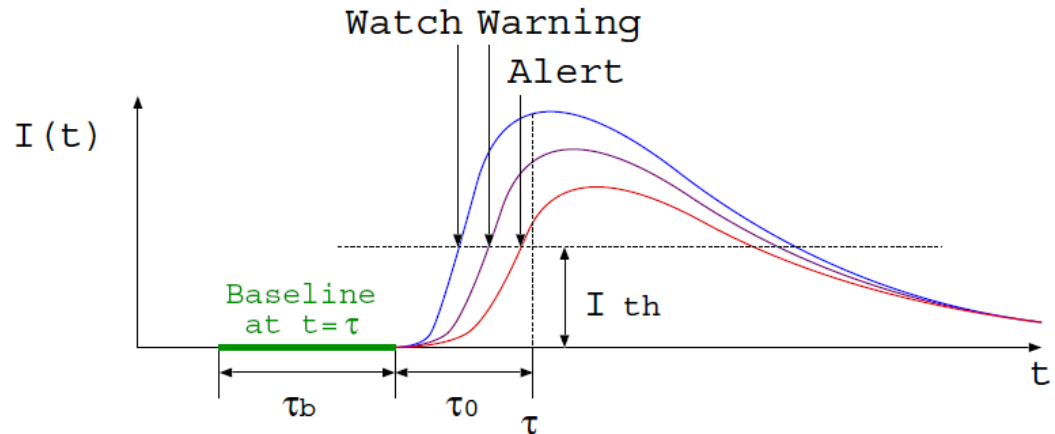
Nain, Canada

Thule, Greenland

McMurdo, Antarctica

South Pole, Antarctica

South Pole Bares, Antarctica



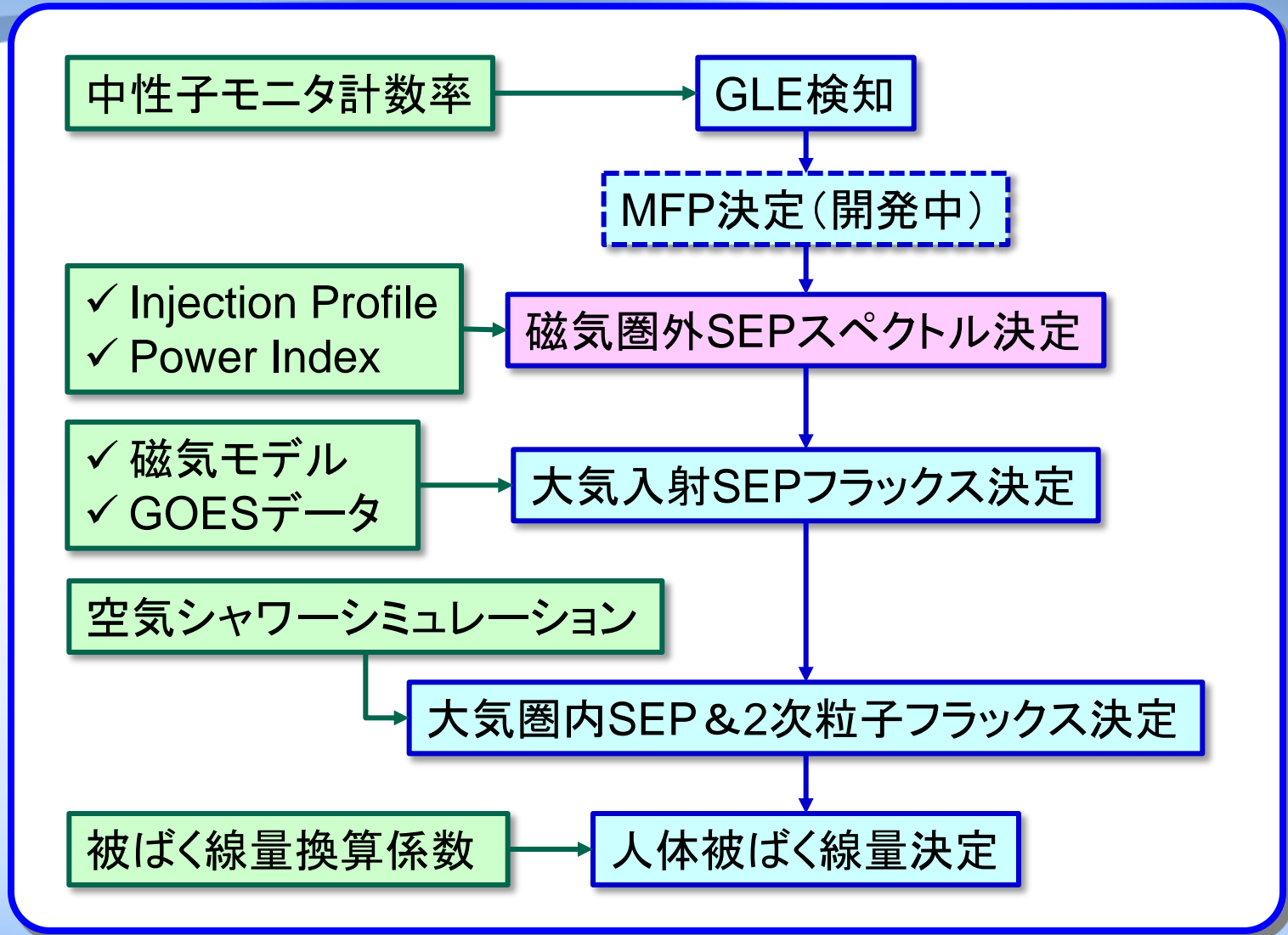
GLE警告発生アルゴリズム

各ステーションに対してしきい値レベル I_{th} を決めておき、そのしきい値を上回るステーションの数により警告をEmailで自動発信する

1 - Watch, 2 - Warning, 3 -Alert.

<http://www.bartol.udel.edu/~takao/neutronm/glealarm/index.html>

WASAVIESフローチャート



磁気圏外側におけるSEPスペクトル計算モデル

Focused Transport Equationに基づく久保モデル

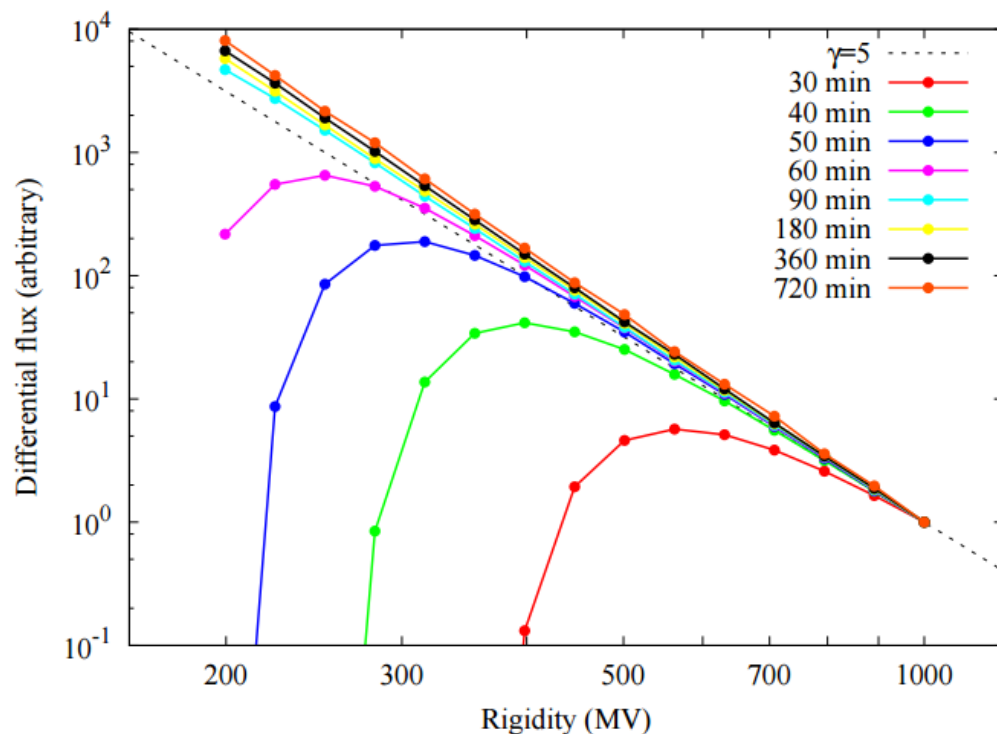
入力パラメータ

- ✓ Power index of Spectrum
- ✓ Mean Free Path
- ✓ Injection Profile

Focused Transport Equation

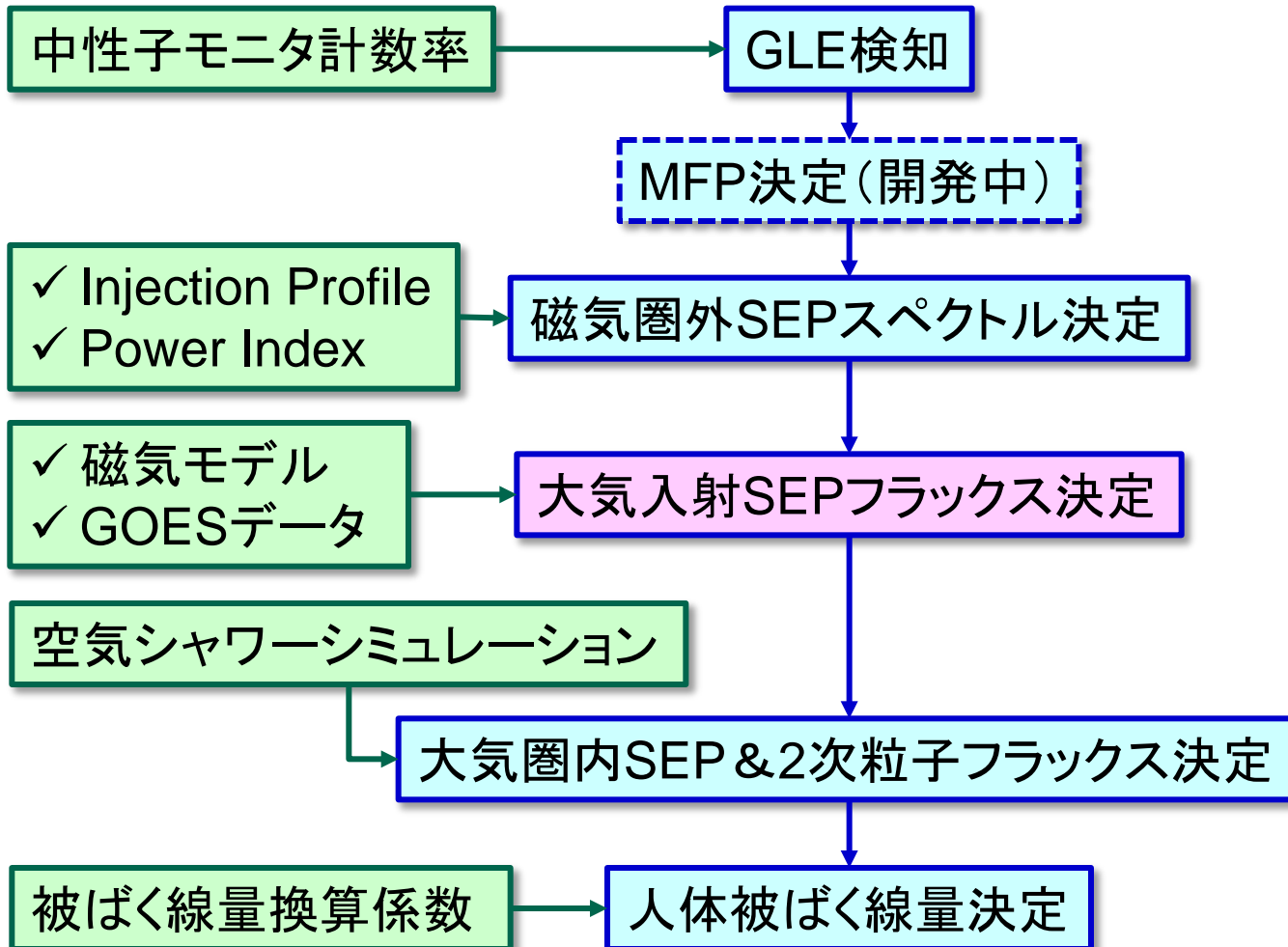
出力情報

- 磁気圏外側におけるSEPの
- ✓ エネルギースペクトル
 - ✓ ピッチ角分布
 - ✓ 時間変化(相対値のみ)



$\gamma=5$ の場合の磁気圏外側におけるSEPのRigidity Spectrumの時間変化
(1,000MVで規格化)

WASAVIESフローチャート



大気入射SEPフラックス計算モデル

反陽子追跡法に基づく片岡モデル

入力情報

- ✓ 磁気圏外側におけるSEPスペクトル&角度分布の時間変化(久保モデル)
- ✓ 磁気モデル(Tsyganenko 1989)
- ✓ GOESで測定した高エネルギー陽子フラックス(規格化に使用)

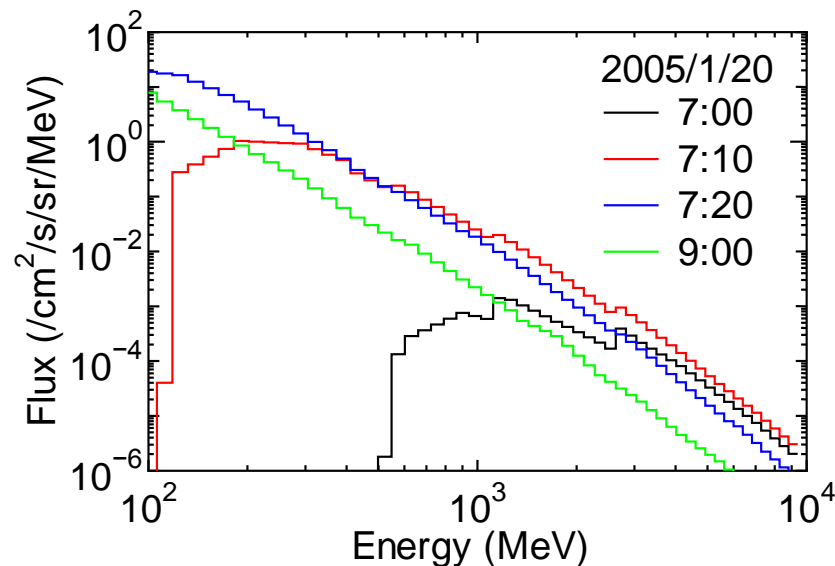
緯度・経度・高度

その地点から反陽子を飛ばして
磁気圏内での軌道を追跡

出力情報

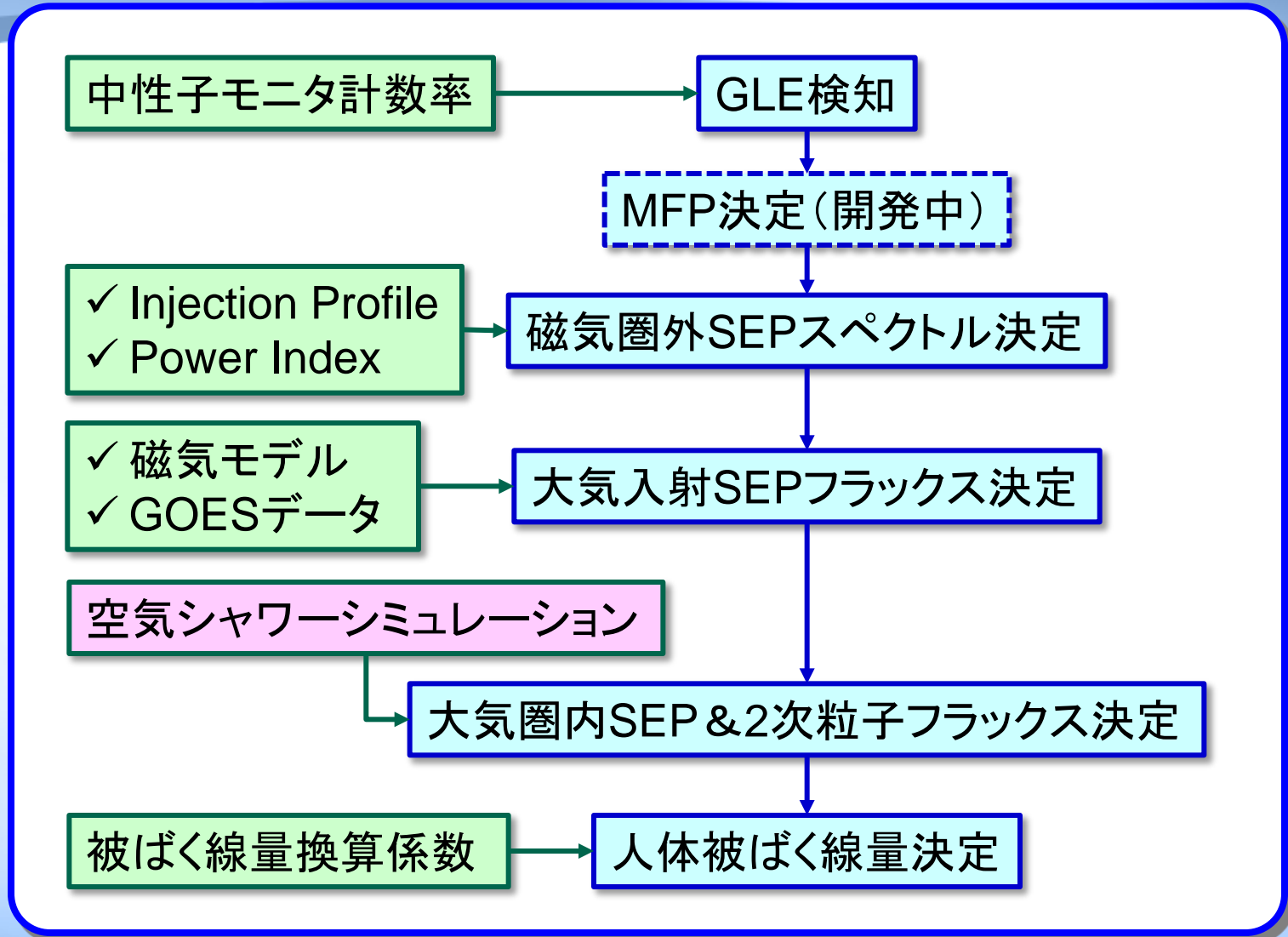
大気圏外の任意地点における

- ✓ SEPスペクトル
- ✓ 時間変化(絶対値)



GLE69発生直後のMcMurdo(南極)
上空86kmのSEPフラックス

WASAVIESフローチャート



空気シャワーシミュレーション

PHITSを用いたモンテカルロ計算

入力情報

- ✓ 大気モデル
(US-Standard Air1976)

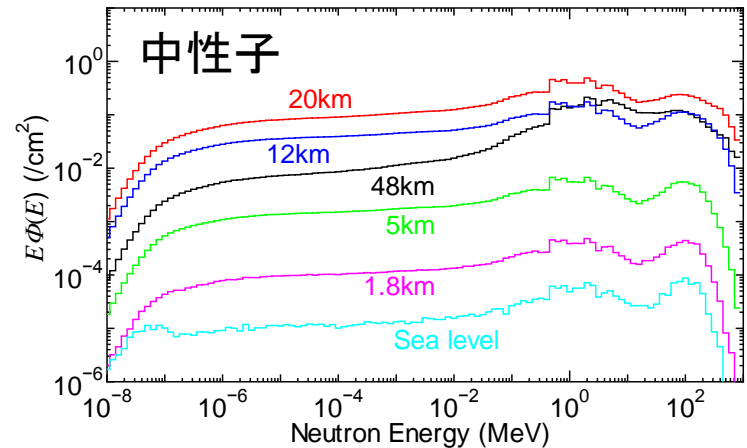
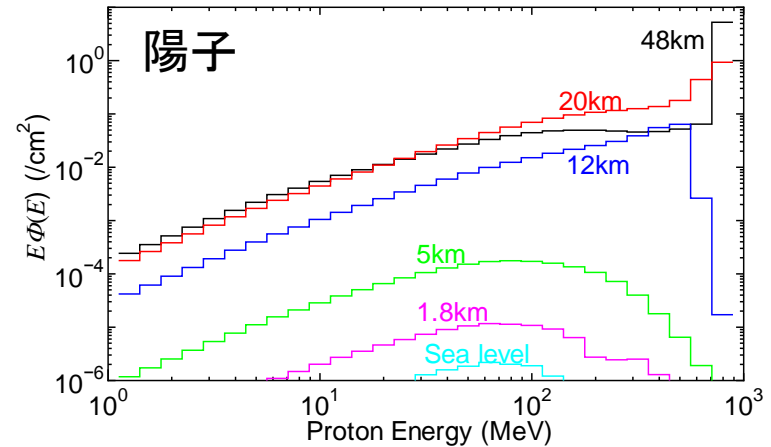
単色陽子入射
(50MeV~10GeV)

大気圏内における宇宙線挙動を第一原理に基づくモンテカルロ計算で再現

出力データベース

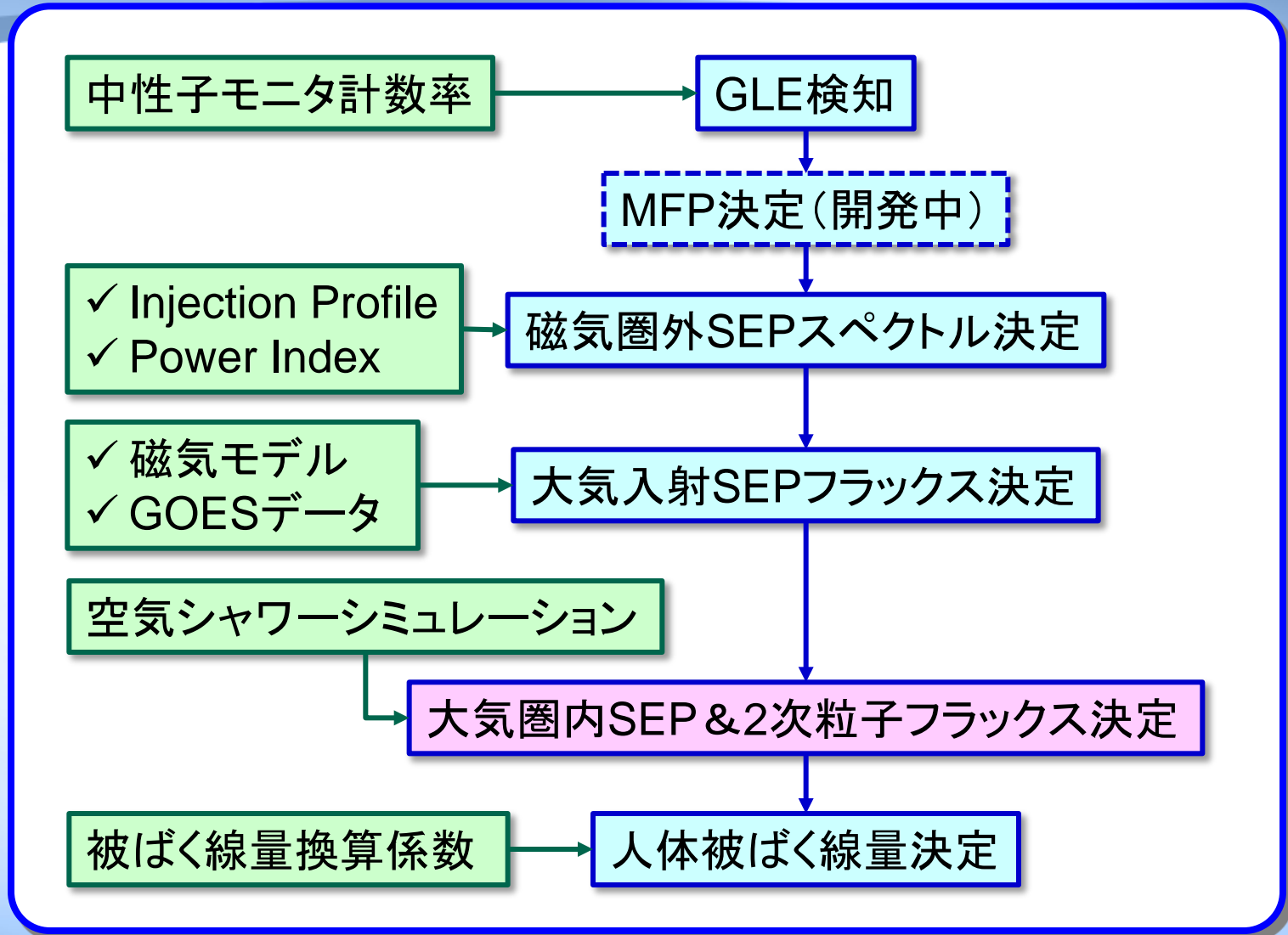
1つの宇宙線が大気に入射したときの任意高度における2次宇宙線フラックス

陽子・中性子・ α 、 $\mu\pm$ 、 $e\pm$ 、 γ



1GeV陽子入射に対するデータベース

WASAVIESフローチャート



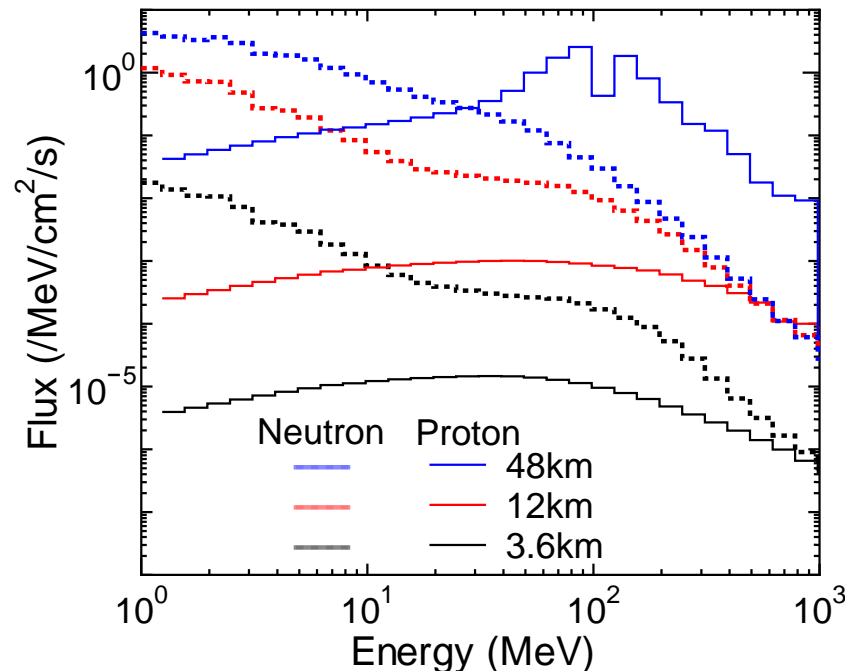
大気圏内SEP & 2次粒子フラックス計算

$$\phi_A(E_A, d) = \int \phi_{\text{TOA}}(E_i) R(E_i, E_A, d) dE_i$$

大気圏内SEP flux
 d :大気深度(g/cm²)

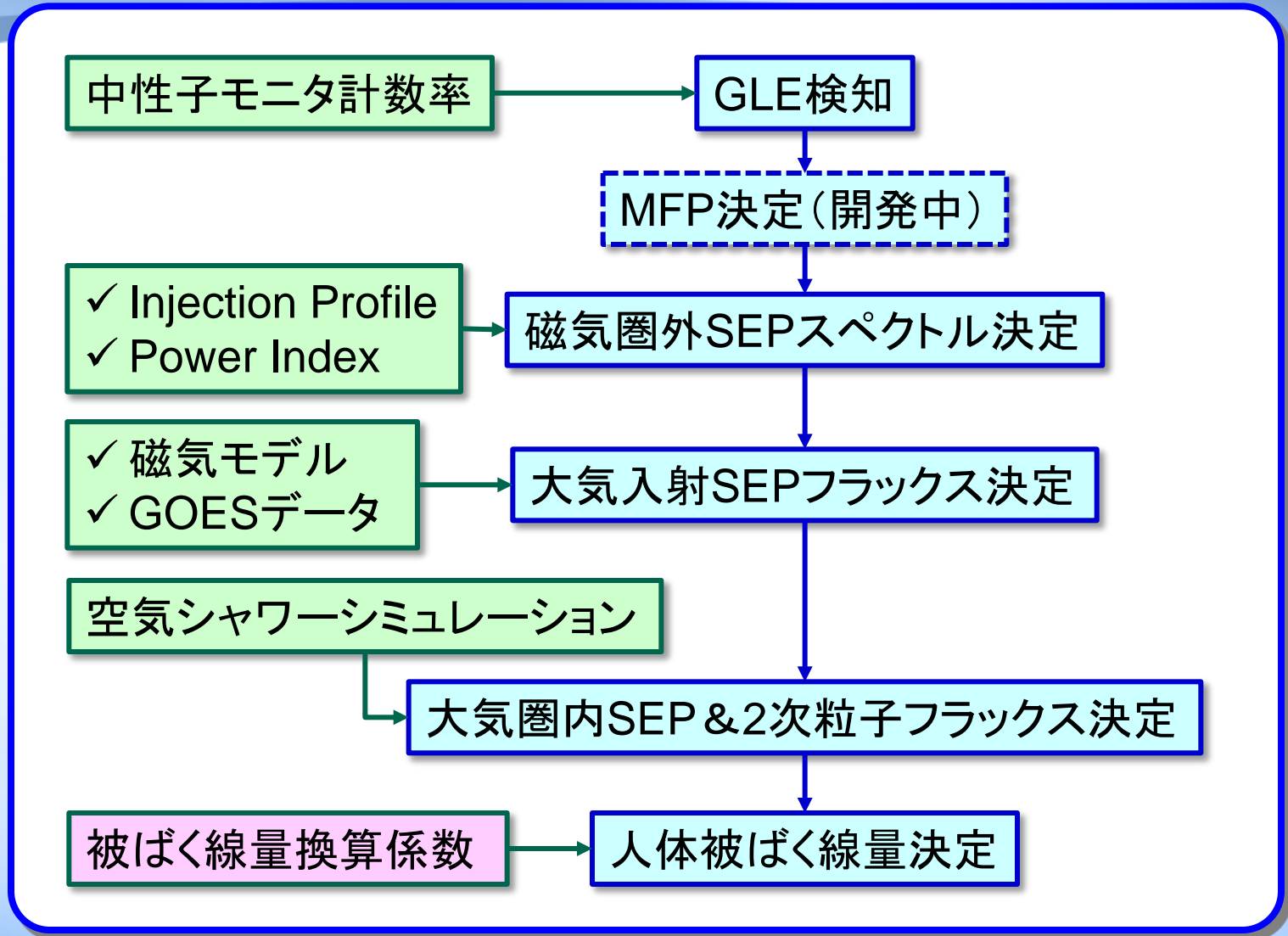
大気入射SEP flux
(片岡モデルで計算)

単色入射に対する空気
シャワー結果のDB



GLE70発生直後のMcMurdo (南極)上空の陽子及び中性子フラックス

WASAVIESフローチャート

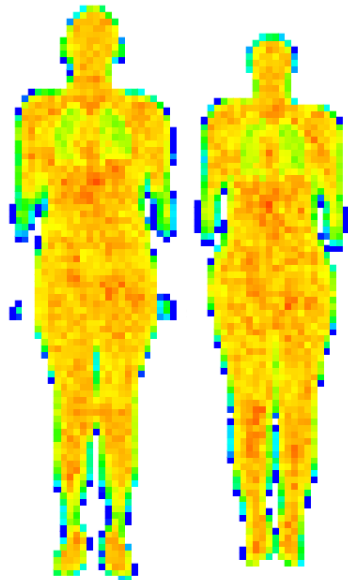


フルエンスから人体の被ばく線量への換算

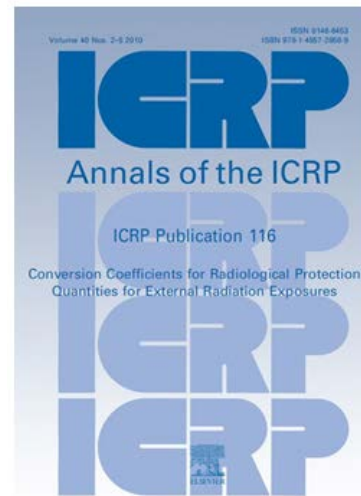
$$\text{被ばく線量} = \text{放射線のフルエンス} \times \text{線量換算係数}$$

計算方法

1. 人体ファントム内における放射線挙動をPHITSで解析
2. 各臓器の吸収線量及び平均線質係数を計算
3. 組織荷重係数や放射線荷重係数を乗じて線量換算係数を導出

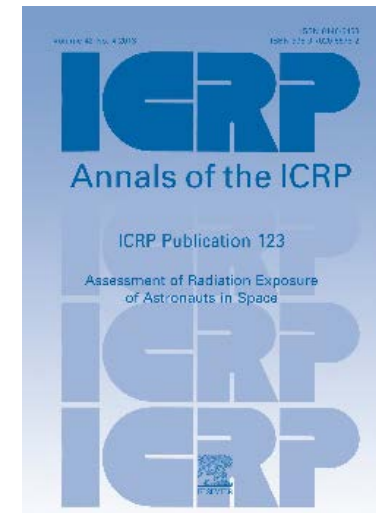


ICRP/ICRUの標準成人
男性(左) & 女性(右)ファントム



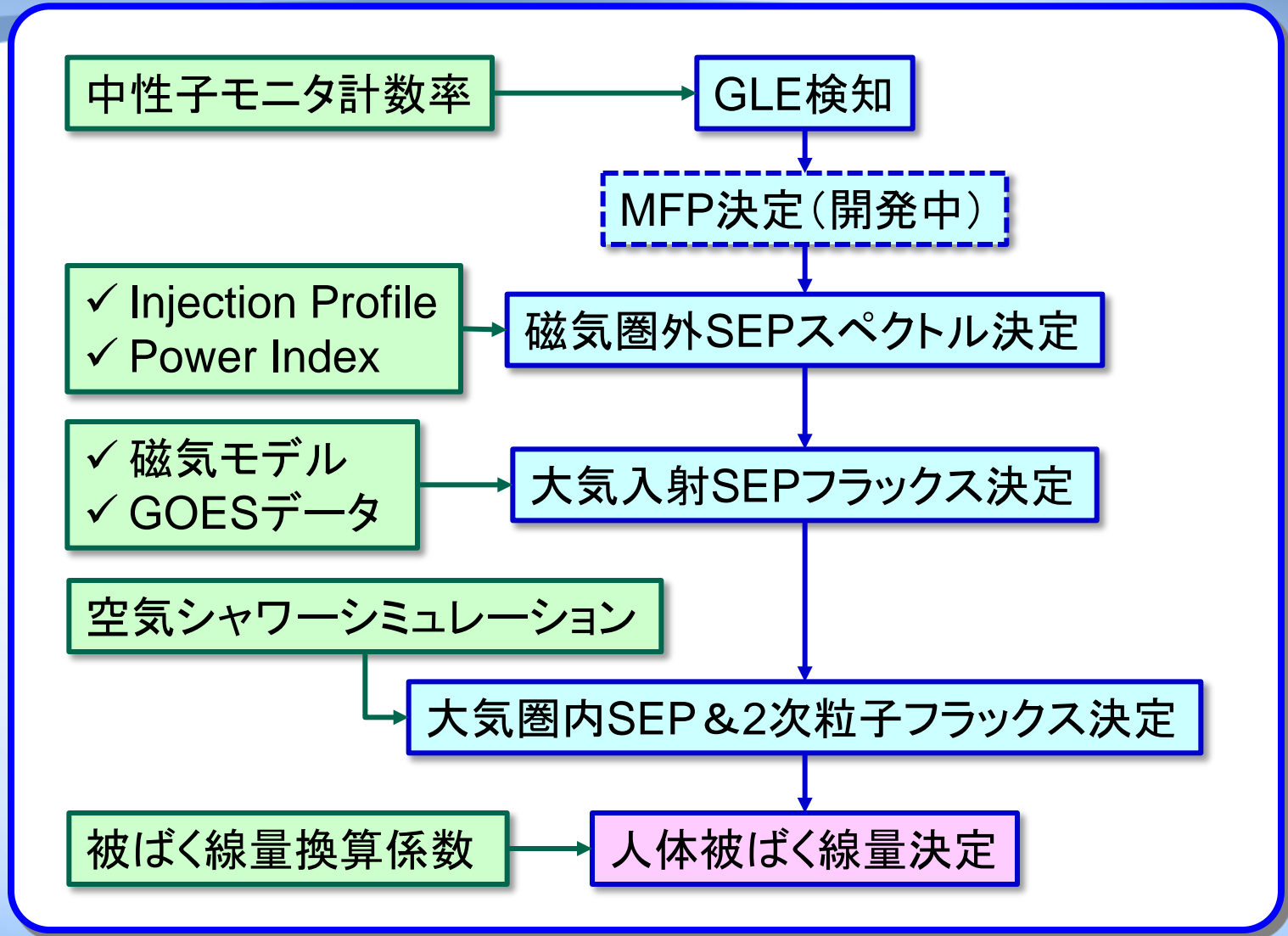
ICRP Pub.116

ICRPによる線量換算係数の評価に利用



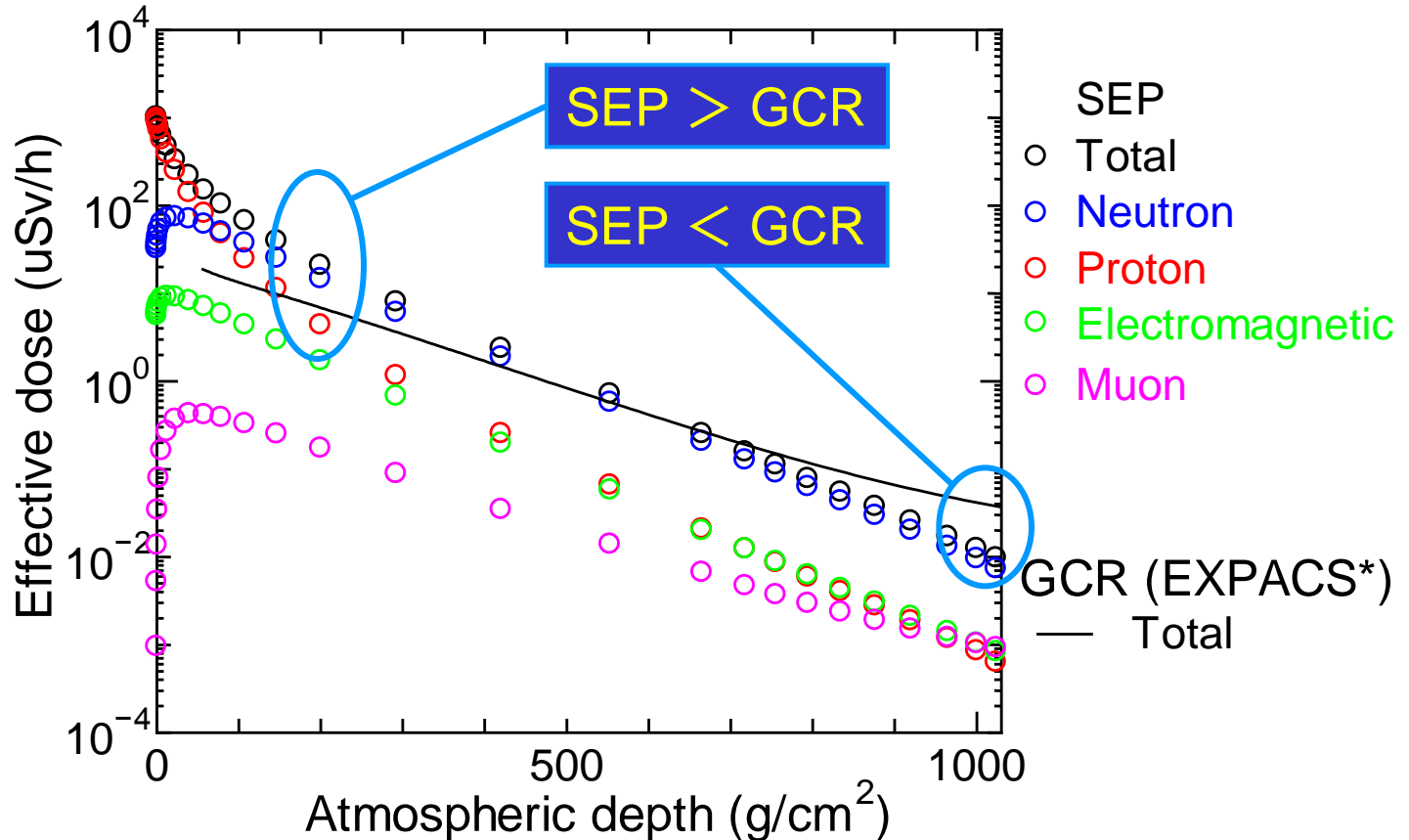
ICRP Pub.123

WASAVIESフローチャート



大気圏内SEP被ばく線量計算

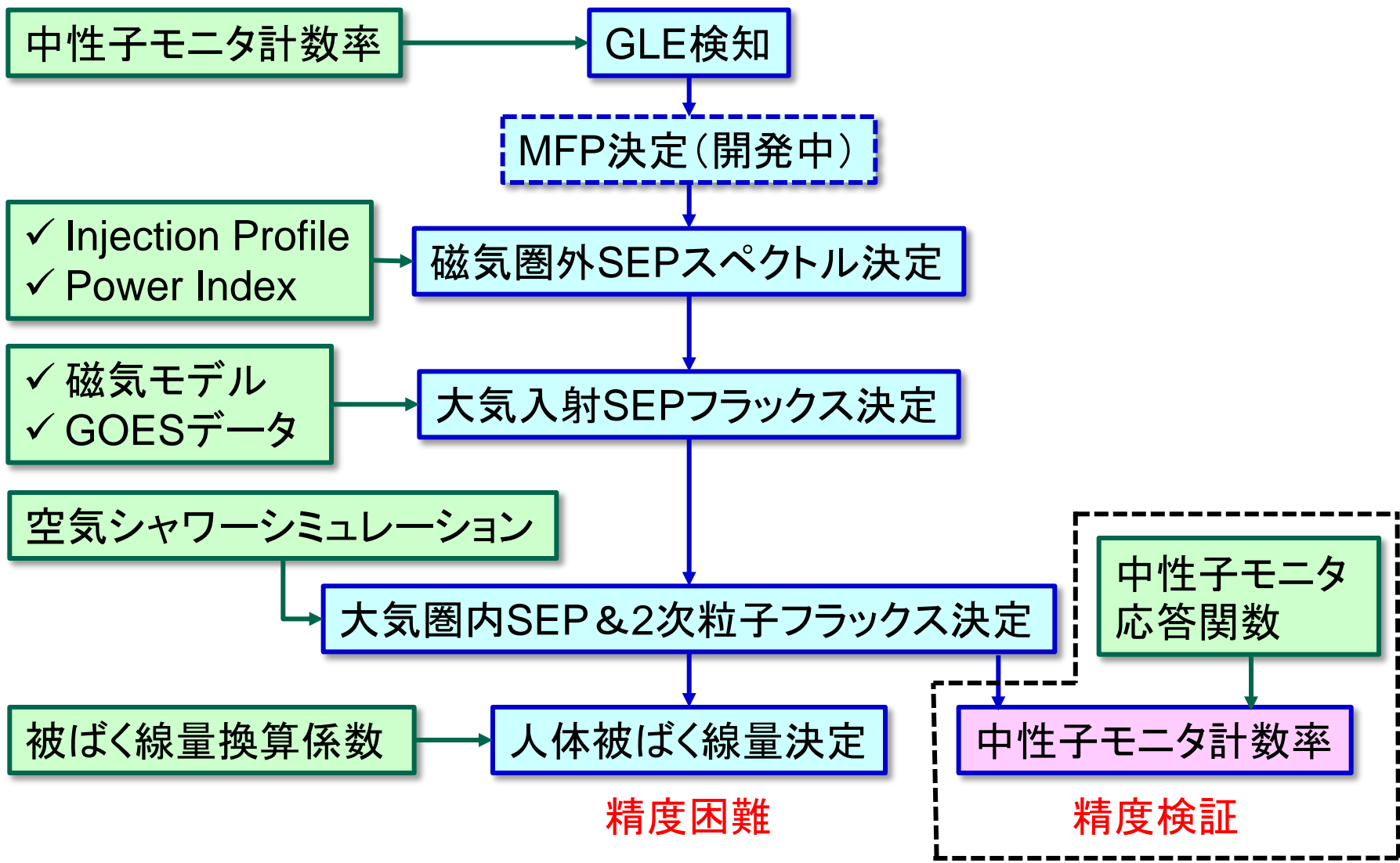
被ばく線量 = \int フラックス \times 線量換算係数



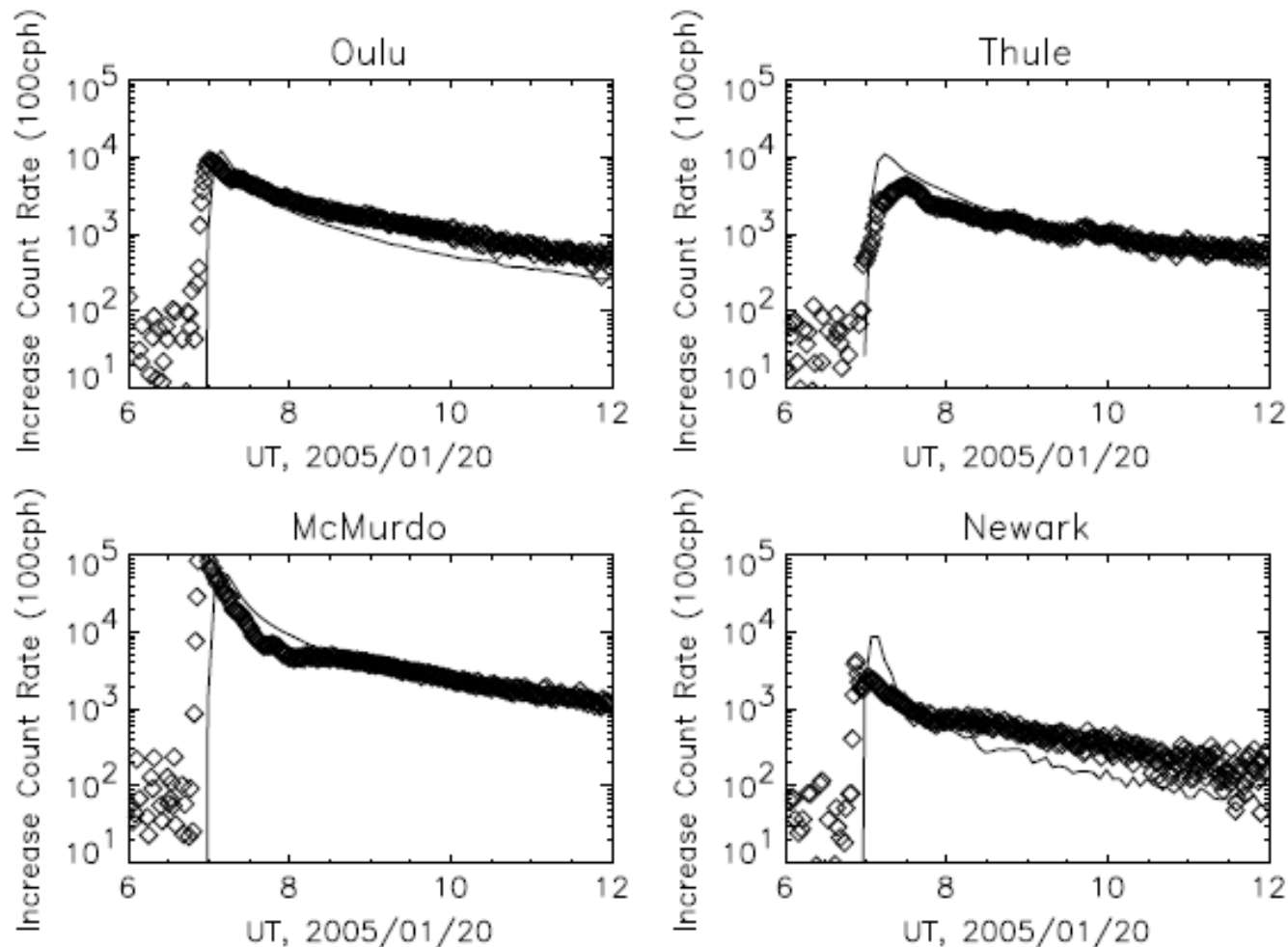
GLE70発生直後のMcMurdo (南極)上空における線量率の高度変化

大気圏内の任意地点(緯度・経度・高度)における被ばく線量を計算可能とした

WASAVIESフローチャート



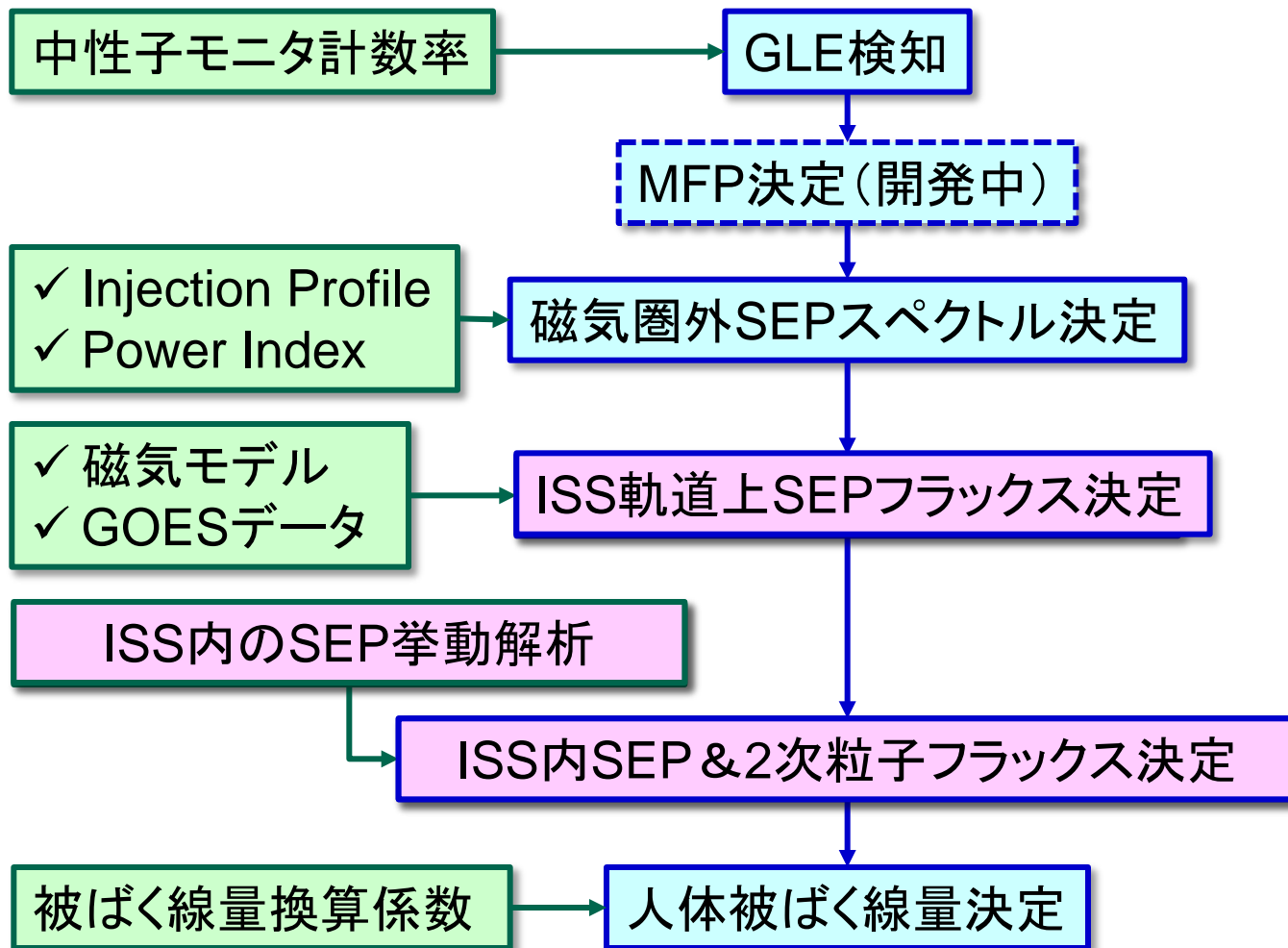
中性子モニタ計数率を用いた精度検証結果



GLE69 (2005/1/20) 時の中性子モニタ計数率の実測値と計算値

世界各地の中性子モニタ計数率変化をファクター3程度の範囲内で再現

宇宙飛行士の被ばく線量評価に応用



ISS内におけるSEP挙動解析

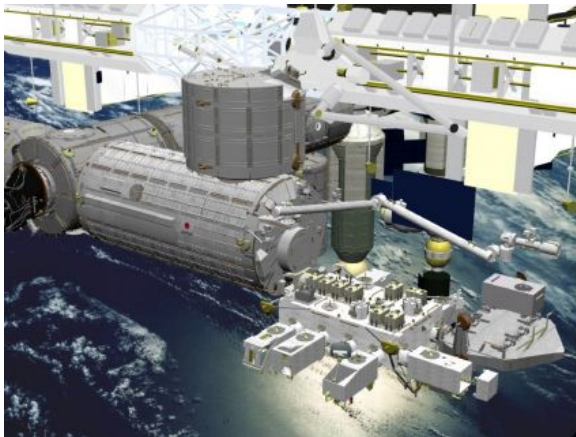
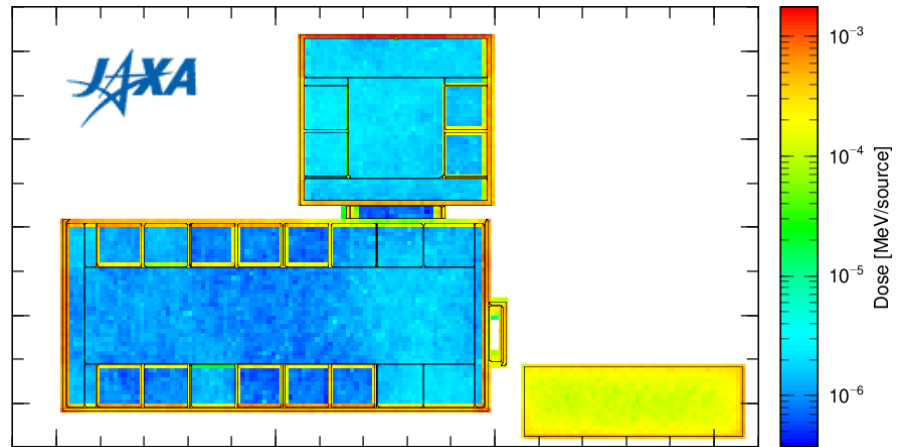
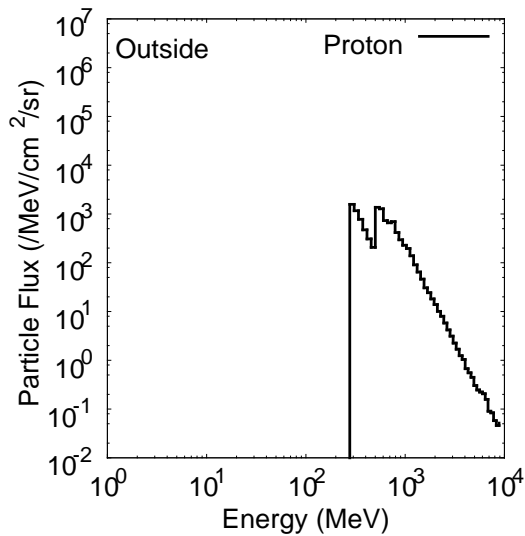


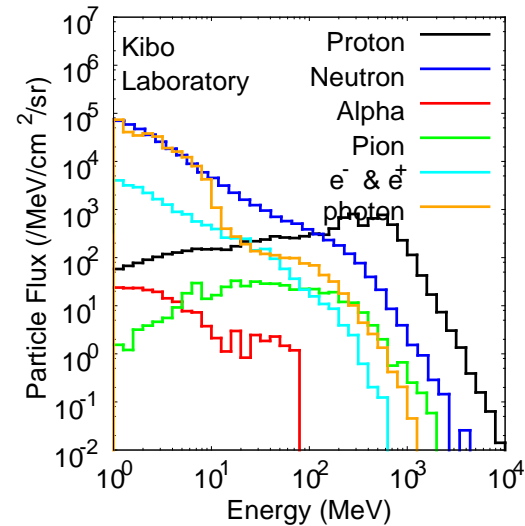
Image of Kibo module



Virtual Kibo module in PHITS

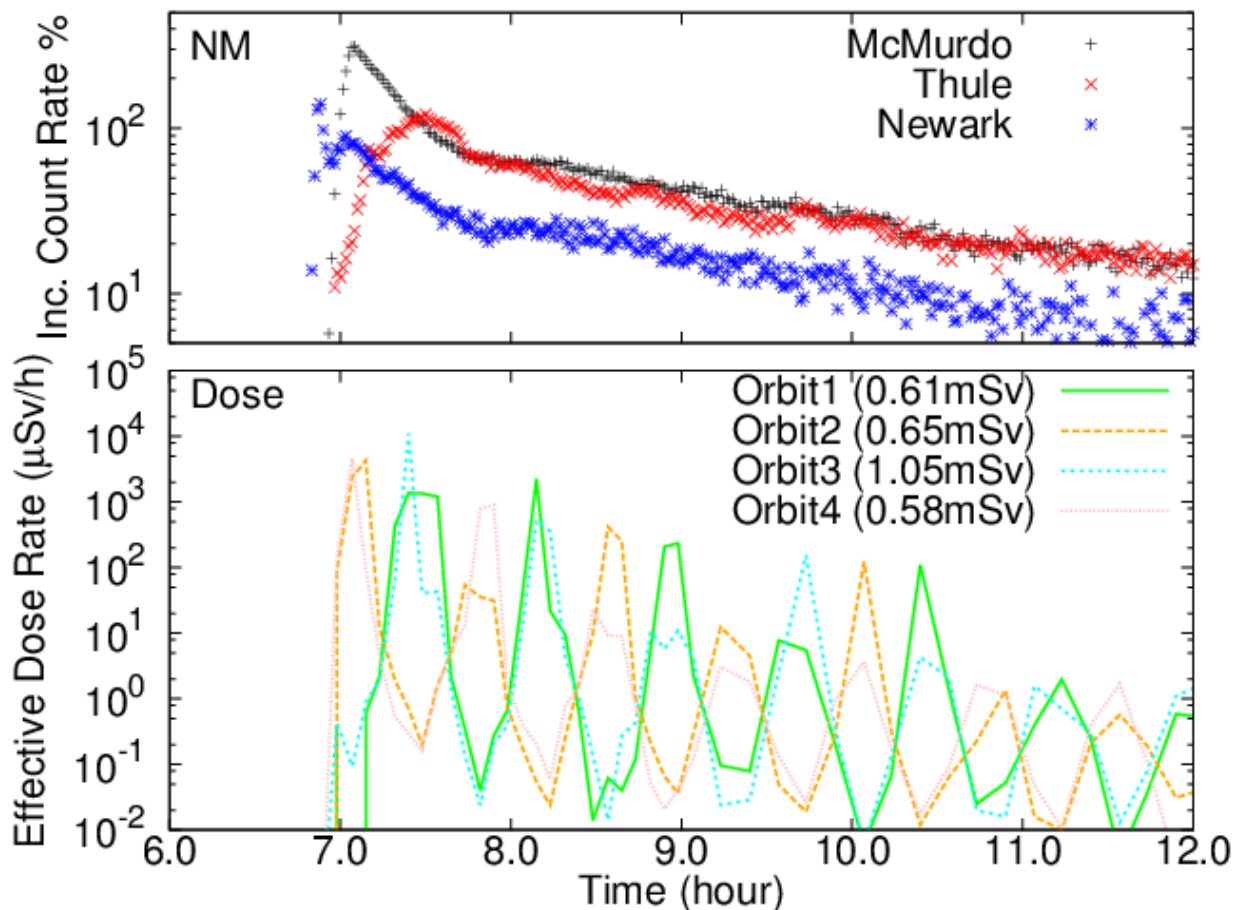


ISS軌道上のSEPフラックス



ISS内のSEP & 2次粒子フラックス

SEPに対する宇宙飛行士の被ばく線量評価



GLE69発生時の中性子モニタ計数率変化(上段)と
きぼうモジュール内に滞在中の宇宙飛行士被ばく線量の推定値(下段)

SPE時の宇宙飛行士被ばく線量をISS軌道やモジュール構造を考慮して評価可能

発表内容

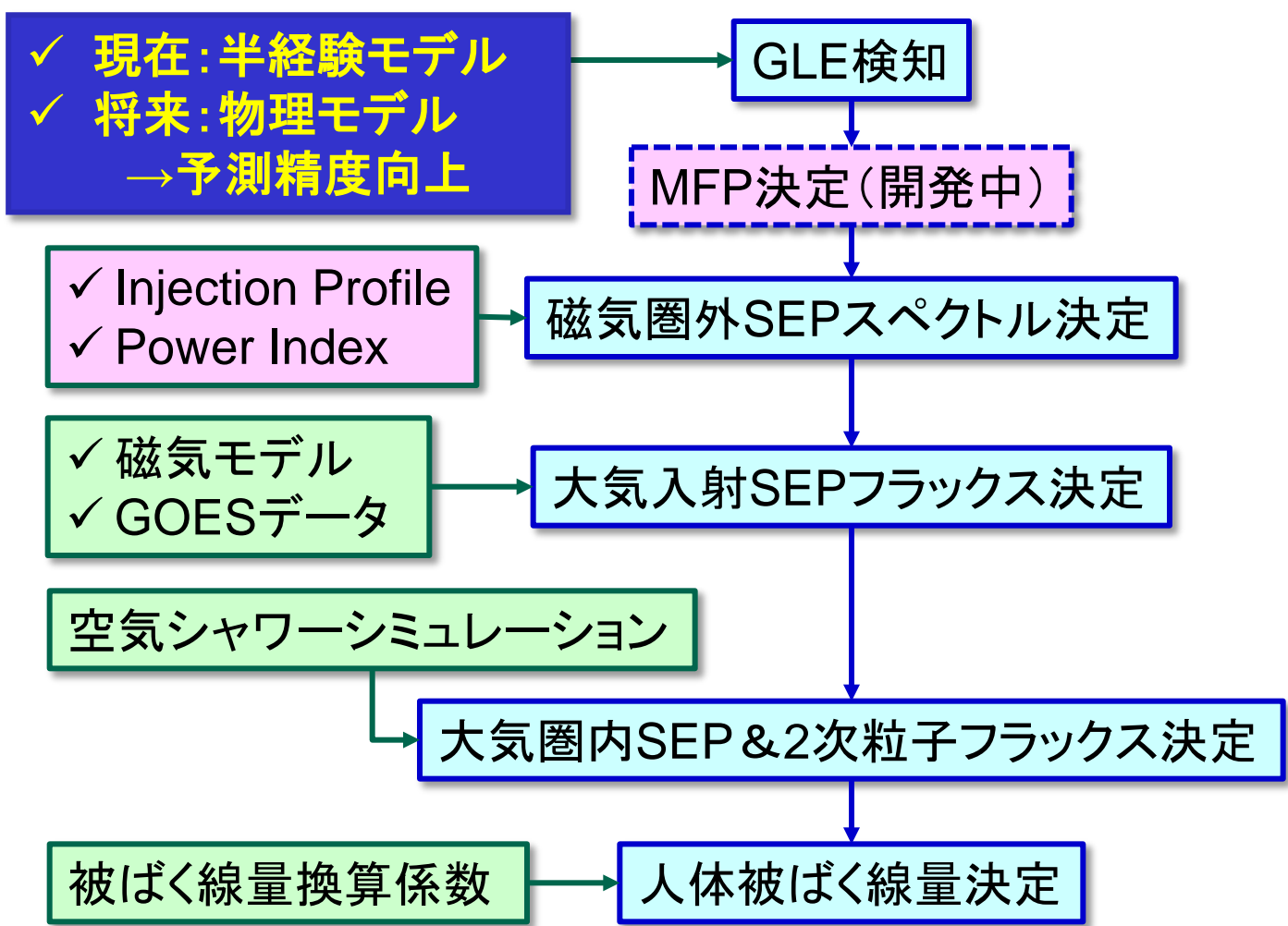
1. 宇宙線被ばくの概要
2. これまでの研究成果
 - ✓ 通常時の被ばく線量評価手法
 - ✓ SPE時の被ばく線量評価手法
3. まとめと今後の展望

まとめ

- ✓ SPE時の被ばく線量予報は、宇宙天気、原子核物理、放射線防護など**様々な研究分野の知見を統合して**初めて可能となる
- ✓ **物理ベースの被ばく線量評価システムWASAVIES**を開発し、過去に発生したSPE時の被ばく線量を再現することに成功した
- ✓ 宇宙天気予報の一環としてエンドユーザー（航空業界・JAXAなど）に必要な情報を提供するためには、モデルの改良やシステム開発など**様々な研究開発が必要**となる

科研費・新学術領域（代表：草野先生・名大）の一環として、今後5年間で重点的に研究を推進する予定

今後5年間の目標



- ✓ 全体を自動化して計算するプログラムの開発
- ✓ 開発したプログラムをNICT宇宙天気予報システムに組み込み
→予測時間短縮, エンドユーザーにデータ提供

長期的な目標

✓ 様々な放射線による被ばく線量の予測

EVAや有人月・惑星探査を想定した電子
($E > 1\text{MeV}$), 陽子 ($E > 2\text{MeV}$) フラックスの予報

✓ 粒子加速メカニズムの解明

✓ 太陽観測データからの予測モデルの開発

究極の目標

GLEの発生を事前に予測し, 航空業界や
宇宙開発機関に警報を発するシステムの構築