

## 話題・解説(I)

# JENDL High Energy File を用いた大気中の宇宙線輸送計算

日本原子力研究開発機構  
放射線防護研究グループ  
佐藤 達彦  
sato.tatsuhiko@jaea.go.jp

## 1. はじめに

1912年、Hess らによって宇宙線の存在が明らかにされて以降、宇宙空間・大気中・地中における宇宙線及びその 2 次粒子スペクトル評価を目的とした様々な実験・理論計算等が行われてきた。それらの研究は、一般に、宇宙の生い立ちや素粒子反応過程など基礎物理学上の重要な知見を得ることを目的としており、その対象となる宇宙線の種類は、主に、陽子・ $\alpha$ ・ミューオンなどの荷電粒子とニュートリノである。

一方、近年、宇宙線に起因する航空機乗務員の放射線被ばくや半導体の誤動作が社会的に大きな関心を集めており、その被ばく線量や誤動作発生率の評価という工学的な側面から、宇宙線スペクトル評価の必要性が高まっている。そのためには、従来の宇宙線研究ではあまり対象とされなかった中性子に対するスペクトル評価が重要となる。なぜなら、航空機乗務員被ばく線量の大部分は中性子による寄与であり、半導体の誤動作は、主に、中性子が半導体有感部分で核反応を引き起こすことにより誘発されるからである。

このような工学的な目的から大気中の中性子スペクトルを測定した例として、ボナーボールを用いて測定した Goldhagen[1], Nakamura[2], Kowatari[3]らの結果がある。しかし、大気中の中性子スペクトルは、高度・地磁気強度・太陽活動周期・周辺環境等に複雑に依存するため、全ての条件に対して測定によりそのスペクトルを評価することは現実的でない。したがって、限られた測定値を再現可能な大気中宇宙線輸送計算モデルを確立し、そのモデルを用いて様々な条件に対する中性子スペクトルを評価する必要がある。しかし、大気は約  $1000 \text{ g/cm}^2$  と極めて厚く、そのような巨大な体系内での放射線挙動を正確に模擬するためには極めて精度のよい核反応モデルが必要となり、核内カスケード [4] (以下 INC と略す) や量子分子動力学 [5] (以下 QMD と略す) モデルなど従来の核反応モデルを採用した輸送計算では、地表面付近における中性子スペクトルを再現できな

い問題点が指摘されていた。

そこで、我々は、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS[6, 7]に最新の JENDL High Energy File[8, 9] (以下 JENDL/HE と略す) を組み合わせて大気中の宇宙線挙動を模擬し、大気中の中性子スペクトルを計算した[10]。本報告では、その計算結果について紹介するとともに、今後の高エネルギー核データファイルの改良に対するユーザーの視点から見た要望について述べる。

## 2. 計算方法

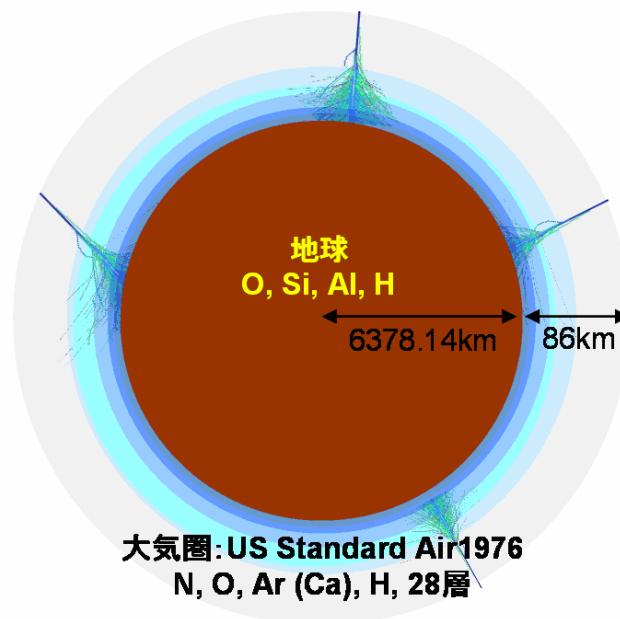


図1 大気中の宇宙線輸送シミュレーション体系

図1に、我々が行った大気中の宇宙線輸送シミュレーション体系を示す。図のように、PHITS シミュレーション内で地球システムを構築するため、O、Si、Al、H (重量比 59.2%, 28.0%, 10.6%, 2.2%) で構成される半径 6378.14km の球体で地球を模擬し、その表面に、上空 86km までの大気層を設定した。大気は、28 層に分割し、各層の密度や温度は US-Standard Air 1976 を用いて決定した。大気の組成は N、O、Ar (重量比 75.4%, 23.3%, 1.3%) とし、これらの元素に加え、高度 2km 以下では水蒸気を模擬するため重量比 0.06% の H を追加した。ただし、Ar に対する核データは JENDL/HE に組み込まれていないため、実際のシミュレーションでは、電荷数の近い Ca に対する核データを代用した。

このような体系に宇宙線が等方入射したときの放射線挙動を PHITS で模擬し、各高度における中性子スペクトルを計算した。その際、入射粒子として、H から Ni まで 28 核種の荷電粒子を考慮し、各荷電粒子のスペクトルは、宇宙線スペクトル計算コード

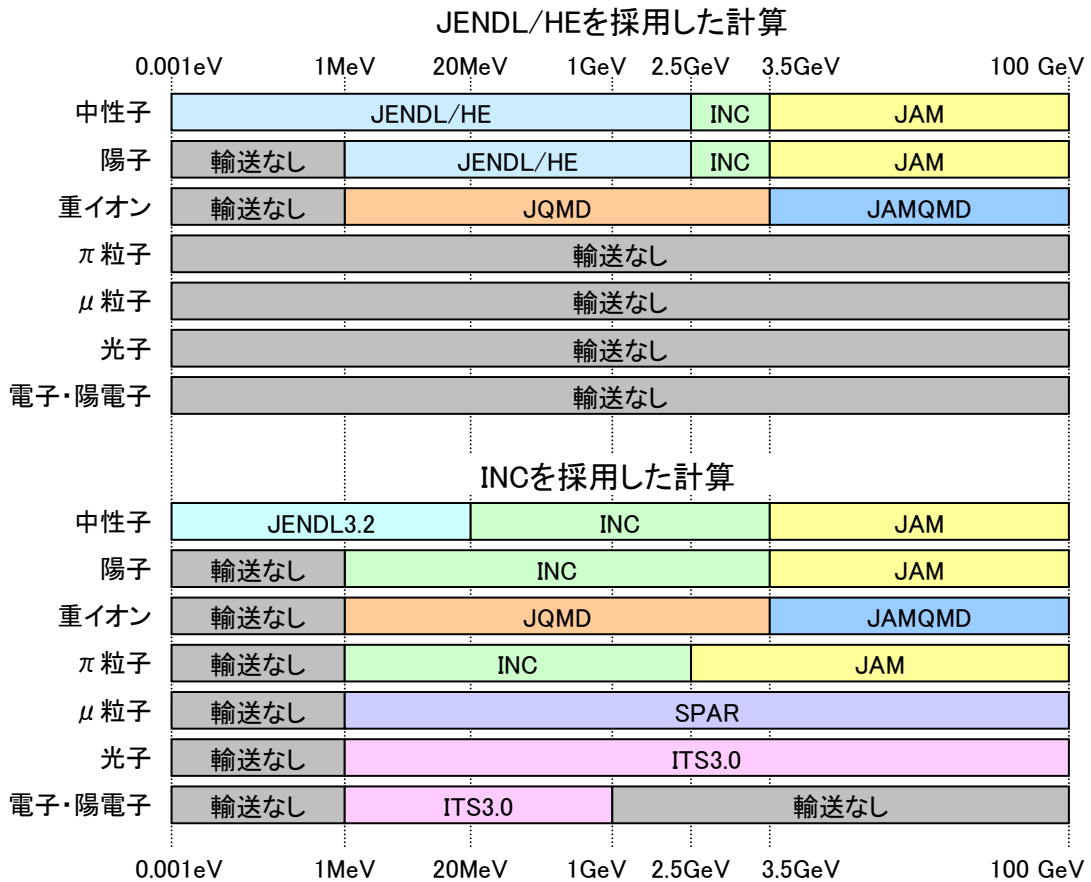


図2 大気中の宇宙線輸送シミュレーションで採用した核反応モデル

CREME96[11]を用いて決定した。また、地球に入射する宇宙線スペクトルは、太陽活動周期を表すパラメータ solar modulation potential<sup>1</sup>と、地磁気強度を表すパラメータ vertical cut-off rigidity<sup>2</sup>により変化し、本研究では、それらのパラメータに対する大気中中性子スペクトルの依存性を検討するため、solar modulation potential 2 条件（太陽活動極大・極小期）及び vertical cut-off rigidity 15 条件（0.1～14GV）に対するシミュレーションを実施した。

さらに、PHITS は採用する核反応モデルを自由に選択できるため、20MeV から 2.5GeV

<sup>1</sup> 太陽活動が活性化すると、太陽風の減速効果（modulation）により地球付近における銀河宇宙線の強度が減少する。したがって、solar modulation potential と大気中の宇宙線強度は、一般に負の相関関係にある。Solar modulation potential は、観測された太陽の黒点数を指標とした半経験式より導出することができる。

<sup>2</sup> Rigidity とは磁場による曲がりにくさの指標であり、高エネルギーかつ電荷の小さい荷電粒子ほど大きい。Vertical cut-off rigidity とは、ある宇宙線が地球に向かって垂直に入射したとき、大気上空に到達できる荷電粒子の最低 rigidity を表す。Vertical cut-off rigidity は、磁極付近で最小となり、磁気赤道付近で最大となる。

の中性子及び陽子に対する核反応モデルとして JENDL/HE を採用した場合と INC を採用した場合の 2 ケースに対してシミュレーションを実施し、両者の違いを検討した。それぞれのシミュレーションで採用した計算モデルをまとめて図 2 に示す。JENDL/HE を採用した場合、JENDL/HE に $\pi$ 生成チャンネルが含まれていないため、 $\pi$ 粒子及びその崩壊過程で発生する $\mu$ 粒子・光子・電子・陽電子に対する輸送は計算しなかった。また、INC として様々なモデルが世界中で開発されているが、本計算で採用した INC モデルは、PHITS にデフォルトで組み込まれているモデルである。詳細は PHITS のマニュアルを参照していただきたい。

### 3. 計算結果及び考察

図 3 に、大気中の中性子スペクトルに関して、上記シミュレーション結果と測定値を比較した結果を示す。図より、JENDL/HE を採用して計算した結果は実験値を極めて精度良く再現できることが分かる。一方、INC を採用した結果は、実験値を大きく過大評価してしまうことが判明した。また、その過大評価の傾向は、特に低高度において顕著になる。これは、INC が大気中の中性子透過率を過大評価する傾向にあることを示している。例として、JENDL/HE 及び INC を用いて計算した 150MeV 中性子が酸素原子

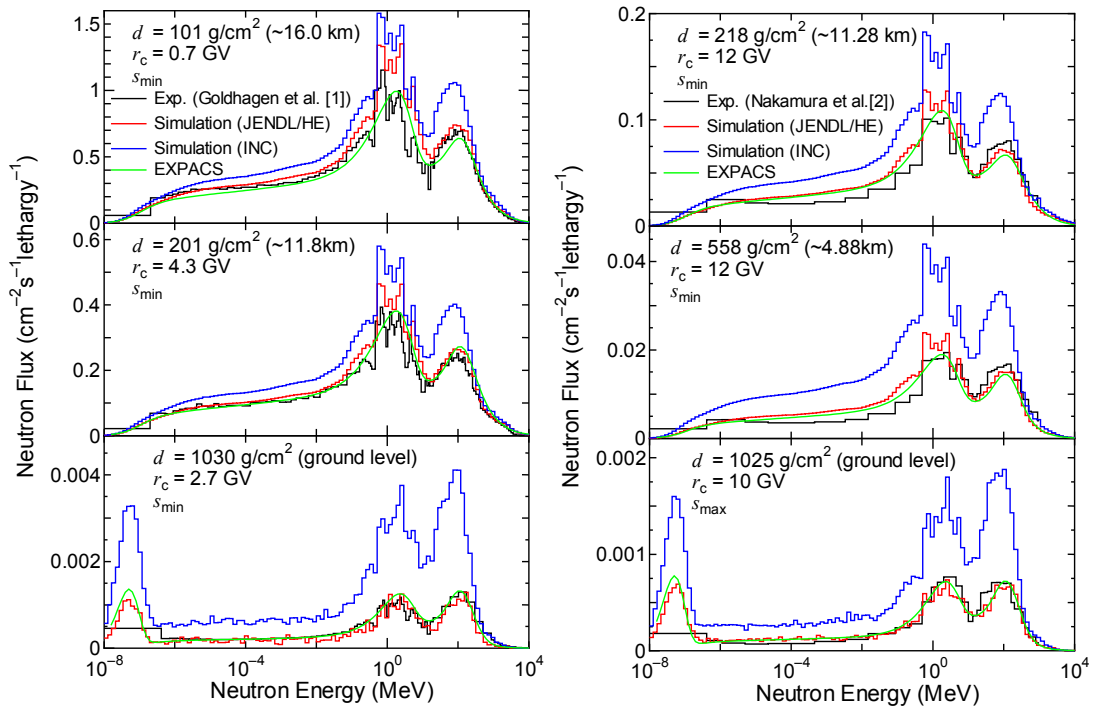


図 3 大気中の中性子スペクトルに対する測定値[1,2]と計算値の比較。図中の指標  $d$  は大気圧、 $r_c$  は vertical cut-off rigidity、 $s_{min}$  及び  $s_{max}$  はそれぞれ太陽活動極小期及び極大期を表す。

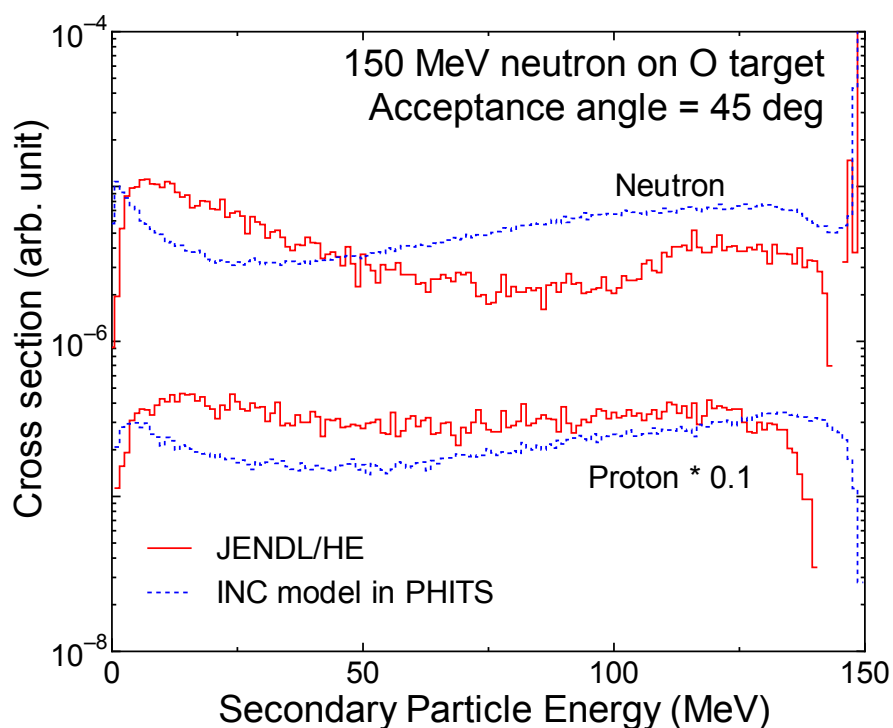


図4 JENDL/HE 及び INC を用いて計算した 150MeV 中性子が酸素原子核に入射したときに発生する中性子及び陽子スペクトル(実験室系において放出角度 45 度以内で積分)

核に入射したときに発生する中性子及び陽子スペクトルを図4に示す。図より、INCは、JENDL/HEと比較して、特に高エネルギー2次粒子生成数を過大評価することが分かる。この過大評価が、INCモデルが大気中の中性子スペクトルを過大評価する最大の要因であると考えられる。

また、JENDL/HEを採用して計算した大気中中性子スペクトルの高度・solar modulation potential・vertical cut-off rigidityに対する依存性を解析し、それを再現可能な計算式を確立した。そして、その計算式を用いて、大気中の任意地点<sup>3</sup>における中性子スペクトルを瞬時に計算可能なエクセルプログラム EXPACS を開発し、Web上で公開した[12]。EXPACSの計算画面の例を図5に示す。EXPACSに、計算したい地点の高度・solar modulation potential・vertical cut-off rigidity・地中の水分含有量もしくは航空機の大きさを入力すれば、瞬時にその地点における中性子スペクトル、及びそのスペクトルに線量換算係数を乗じて導出した実効線量率及び周辺線量当量率が表示される。また、EXPACSを用いて計算した中性子スペクトルを図3に併せて示す。図3より、計算式による結果は、モンテカルロ計算と同等、もしくはそれ以上の精度で測定結果を再現可能であることが分かる。こ

<sup>3</sup> 高度 20km 以下に限定。通常の航空機飛行高度は、最大で約 12km。

これは、確立した計算式では、航空機の大きさや地表面の水分含有量などの情報を基に、航空機による遮へい効果や地表面からのアルベド中性子による寄与を正確に考慮可能なためである。

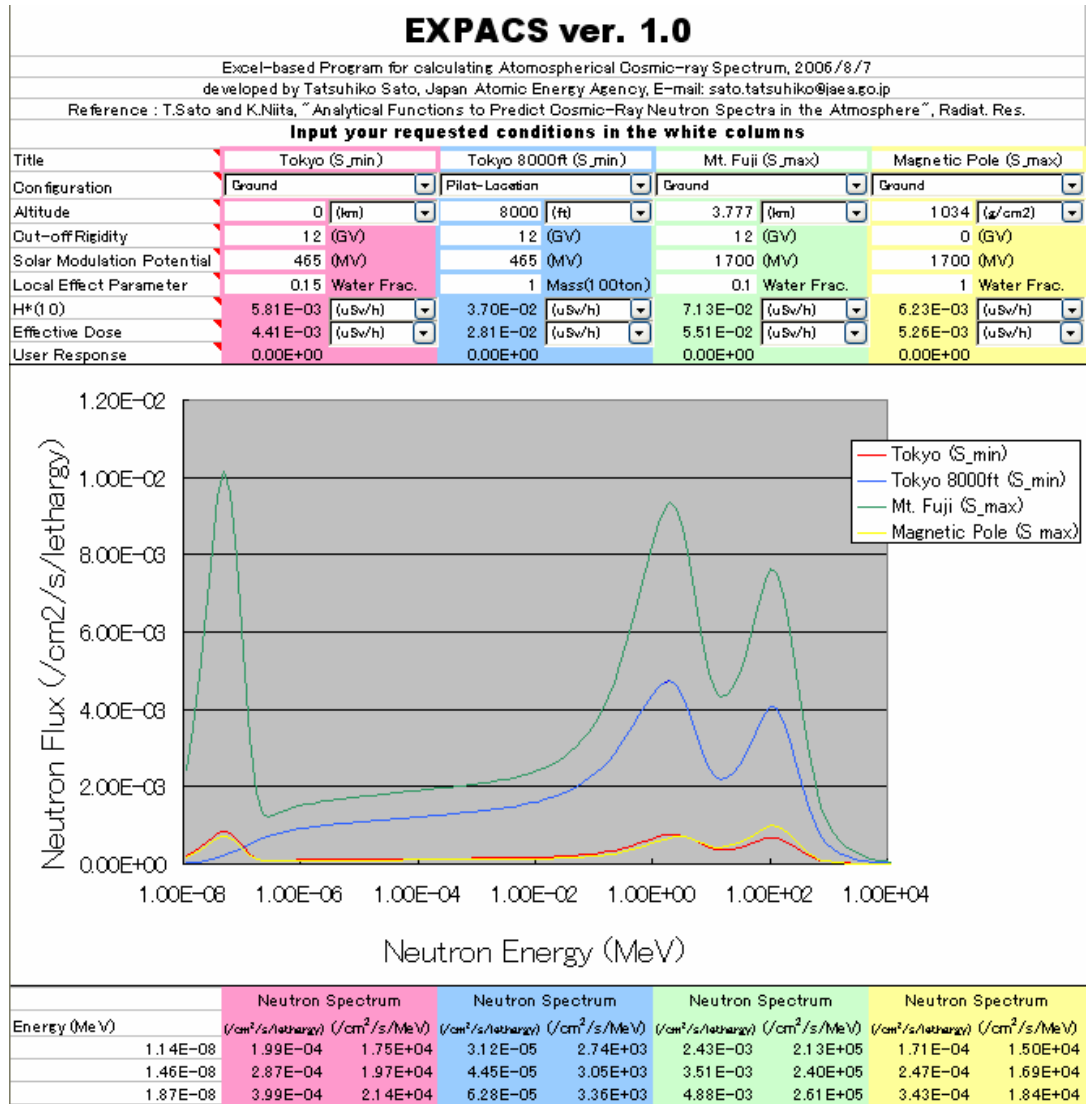


図 5 EXPACS の計算画面例

#### 4. まとめ

粒子輸送計算コード PHITS を用いて大気中の宇宙線挙動を模擬し、大気中における中性子スペクトルを計算した。得られた計算値を測定値と比較した結果、高エネルギー中性子及び陽子核反応モデルとして JENDL/HE を採用した場合、INC モデルを採用した場合と比較して格段に実験値の再現性がよいことが判明した。大気中の宇宙線輸送計算は、深層透過計算の一種であり、地表面における中性子スペクトルの測定は、線源（宇宙線

スペクトル) 及び遮へい体 (大気) 組成の明確さという観点から最も信頼性の高い遮へい実験の一種である考えられる。したがって、本結果は、JENDL/HE が高エネルギー加速器施設の遮へい設計に極めて有用なツールとなる可能性を示唆するものである。

今後は、中性子だけでなく、大気中の陽子・ $\pi$ 粒子・ $\mu$ 粒子・光子・電子・陽電子スペクトルを計算する予定である。しかし、現在、PHITS で利用可能な JENDL/HE のデータライブラリには $\pi$ 生成チャンネルが含まれておらず、 $\pi$ 粒子及びその崩壊過程で発生する $\mu$ 粒子・光子・電子・陽電子スペクトルを正確に計算することはできない。この中で、 $\mu$ 粒子は、地表面における宇宙線被ばく線量寄与の大部分を占めるため、そのスペクトル評価は極めて重要である。また、 $\mu$ 粒子による被ばく線量評価は、高エネルギー加速器施設の遮へい設計においても重要となる。したがって、放射線防護に関連する研究分野では、JENDL/HE を採用し、 $\pi$ 生成チャンネルも考慮可能な計算手法の確立が強く期待されている。さらに、検出器応答関数の計算や粒子線治療における放射線人体影響解析の際には、核反応により生成する全ての 2 次粒子に関する情報をイベント毎に評価することが望ましく、今後、様々な目的に JENDL/HE を適用するためには、イベントジェネレータとしての使用を念頭においた高エネルギー核データの構築について検討する必要があると考える。本報告が、JENDL/HE の信頼性向上、及び今後の発展の一助となれば幸いである。

## 謝辞

本報告を作成するにあたり数多くの貴重な助言を頂きました高度情報科学技術研究機構の仁井田浩二氏に深く感謝いたします。また、JENDL/HE を使用する際、貴重な助言をいただきました九州大学の渡辺幸信助教授、日本原子力研究開発機構の深堀智生氏に深く感謝いたします。さらに、大気中の宇宙線輸送計算を行う際、並列計算機を使用するための技術的な支援をしていただいた日本原子力研究開発機構情報システム管理課の皆様にも深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] P. Goldhagen, J.M. Clem and J.W. Wilson, The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude. *Radiat. Prot. Dosim.* **110**, 387-392 (2004).
- [2] T. Nakamura, T. Nunomiya, S. Abe, K. Terunuma and H. Suzuki, Sequential measurements of cosmic-ray neutron spectrum and dose rate at sea level in Sendai, Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 843-853 (2005).
- [3] M. Kowatari, K. Nagaoka, S. Satoh, Y. Ohta, J. Abukawa, S. Tachimori and T. Nakamura, Evaluation of the altitude variation of the cosmic-ray induced environmental neutrons in the Mt. Fuji area. *J. Nucl. Sci. Technol.* **42**, 495-502 (2005).

- [4] H.W. Bertini, Low-energy intranuclear cascade calculation. *Phys. Rev.* **131**, 1801-1821 (1963).
- [5] K. Niita, S. Chiba, T. Maruyama, H. Takada, T. Fukahori, Y. Nakahara and A. Iwamoto, Analysis of the (N,xN') reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model. *Phys. Rev.* **C52**, 2620-2635 (1995).
- [6] H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura, Development of a general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code. *J. Nuc. Sci. Technol.* **39**(11) 1142-1151 (2002).
- [7] K. Niita, T. Sato, H. Iwase, H. Nose, H. Nakashima and L. Sihver, Particle and heavy ion transport code system; PHITS, *Radiat. Meas.* **41**(9-10), 1080-1090 (2006).
- [8] T. Fukahori, Y. Watanabe, N. Yoshizawa, F. Maekawa, S. Meigo, C. Konno, N. Yamano, A.Yu. Konobeyev and S. Chiba, JENDL High Energy File. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Suppl. 2**, 25-30 (2002).
- [9] Y. Watanabe, T. Fukahori, K. Kosako, N. Shigyo, T. Murata, N. Yamano, T. Hino, K. Maki, H. Nakashima, N. Odano and S. Chiba, Nuclear data evaluations for JENDL high-energy file. *Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Santa Fe, USA, Sep.26-Oct.1, 2004; AIP CP769, p326-331 (2005).
- [10] T. Sato and K. Niita, Analytical function to predict cosmic-ray neutron spectrum in the atmosphere, *Radiat. Res.* **166**, 544-555 (2006).
- [11] A.J. Tylka, J.H. Adams, Jr., P.R. Boberg, B. Brownstein, W.F. Dietrich, E.O. Flueckiger, E.L. Petersen, M.A. Shea, D.F. Smart and E.C. Smith, CREME96: A revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **44**, 2150-2160 (1997).
- [12] <http://www3.tokai-sc.jaea.go.jp/rphpwww/radiation-protection/expacs/expacs.html>