

Radiological Sciences

放射線科学

2008.11

Vol.51

第51巻 第11号

JISCARD Japanese Internet System for the Calculation of
Aviation Route Doses

特集

放医研が開発した航路線量
計算システム“JISCARD”

ISSN 0441-2540

Contents

- 04 **特集 / 放医研が開発した航路線量計算システム “JISCARD”**
「飛行機で被ばくする線量を知らせるプログラム」
 A NIRS's Product: Japanese Internet System for the Calculation of Aviation Route Doses "JISCARD". The program which informs us of cosmic radiation doses in an aircraft.
 放射線防護研究センター 宇宙線被ばく研究チーム
 保田 浩志
- 13 **国際機関活動報告**
「原子力の平和利用 (Atoms for Peace) としての “アイソトープと放射線技術の利用”
 —国際原子力機関—
 Application of Isotopes & Radiation Technologies
 国際原子力機関ヒューマンヘルス部核医学課
 渡邊 直行
- 20 **印象記**
「第7回放射線生物学に関する日仏ワークショップ」
 The 7th Japan-France Workshop on Radiation Biology
 重粒子医科学センター 粒子線生物研究グループ 細胞分子機構研究チーム
 高橋 桃子
- 23 **放射線の知識**
「中性子線照射に関する物理的な側面」
 (5) LETカウンターによる線質測定
 基盤技術センター 研究基盤技術部 放射線計測技術開発室
 高田 真志
 放射線発生装置利用技術開発課
 平岡 武
- 30 研究集会のお知らせ
 第3回放射線防護研究センターシンポジウム
- 31 編集後記

A NIRS's Product
 Japanese Internet System for the Calculation of
 Aviation Route Doses
“JISCARD”
 The program which informs us of
 cosmic radiation doses in an aircraft.

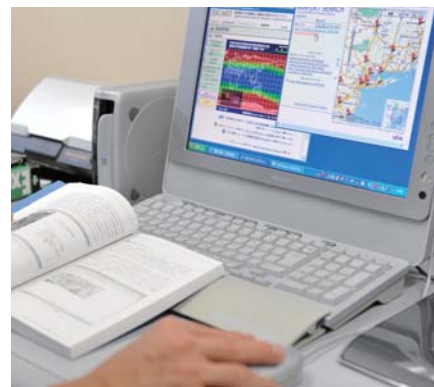
▲宇宙線被ばく線量の計算精度を検証するために登った富士山頂で偶然頭上を通り過ぎたジェット機と飛行機雲



▲航空機内で計算精度の検証に用いる放射線測定装置



▲測定装置で得られたデータを放医研で解析しているところ



▲実測値との比較で航路線量計算プログラムの精度を確認



▲温室前に咲いた10月桜

特集/放医研が開発した航路線量計算システム「JISCARD」

飛行機で被ばくする線量を知らせるプログラム

A NIRS's Product: Japanese Internet System for the Calculation of Aviation Route Doses "JISCARD". The program which informs us of cosmic radiation doses in an aircraft.



保田 浩志 (Hiroshi Yasuda)

放射線防護研究センター
宇宙線被ばく研究チーム チームリーダー
保田 浩志

A NIRS's Product
Japanese Internet System for the Calculation of
Aviation Route Doses
"JISCARD"
The program which informs us of
cosmic radiation doses in an aircraft.

<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml>

飛行機に乗ると被ばくする?

宇宙から飛来する放射線(以下「宇宙線」という。)の強度は、高度が高くなるほど強くなります。民間の航空機が飛行する高度(10~12km)では、地上に比べて百倍ほどの強さです。日本の地上で1日あたりに受ける宇宙線の量はおよそ0.001mSv(1μSv)ですが、日本から欧米へ飛行機で1回往復すると0.1mSvほど被ばくします。

0.1mSvといっても、私たちは普段の生活で年間2mSvほどの放射線を自然界から受けていますから、年に1~2回遠くの国へ出かけてもこれが数%増える程度です。健康への影響を憂慮するほどの量ではありません。しかし、自分がどのぐらい放射線を浴びたのか

を知り、化学物質や病原菌などの情報も併せて、健康な環境で暮らしているという自信を一人一人が持てるようにすることは重要と考えています。

そこで、放医研では、日本人々に航空機搭乗中の宇宙線被ばくについて知って頂くことを狙いとして、航空機搭乗時の被ばく線量(以下「航路線量」という。)やそれに関連した情報を提供するウェブツールを開発しました¹⁾。「航路線量計算システム(JISCARD: Japanese Internet System for the Calculation of Aviation Route Doses)」(以下「JISCARD」という。)と呼ばれるこのツールは、2005(平成17)年9月に放医研のホームページ上で公開され、徐々に機能を拡張・改良しながら運用されています。2008(平成20)年9月には、利用者が任意に

選んだ路線の航路線量を精緻に計算できる、個人向けの航路線量計算プログラムの提供も新たに開始しました。

本報では、この「JISCARD」の概略を紹介させて頂きたいと思います。

JISCARDのあらまし

JISCARDのトップページ²⁾にアクセスすると、図1のような画面が現れます。

トップページでは、サイトの更新履歴、宇宙天気情報、日常受ける被ばくに関する動画解説等の情報を提供しています。宇宙天気情報は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の協力を得て、NICT宇宙天気情報センター

から随時提供されているRSS(Rich Site Summary)情報³⁾のうち、宇宙線被ばくに関する最新の知らせ(宇宙天気ニュースと高エネルギー粒子イベント)を自動で更新表示するようにしています。その他、各ページ(航路線量計算プログラム、JISCARDの説明、関連情報、用語集、お問合せ等)に移るためのボタンやタブを用意しています。

■航路線量計算

日本発着の主要な国際航空路線について、往・復それぞれの飛行における航路線量(宇宙線による被ばくがもたらす実効線量)の値を提示します。

フラッシュ版のプログラムでは、出発空港、到着空港、

航路線量計算

JISCARDの説明

主なサイト更新履歴

NICT宇宙天気情報(RSSフィード)

専門用語の解説

宇宙線被ばくに関する情報(宇宙線強度分布画像など)

拡張プログラム・データ

日常生活における被ばくについて(動画解説有り)

図1: 航路線量計算システム(JISCARD)のトップページ (<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml>)

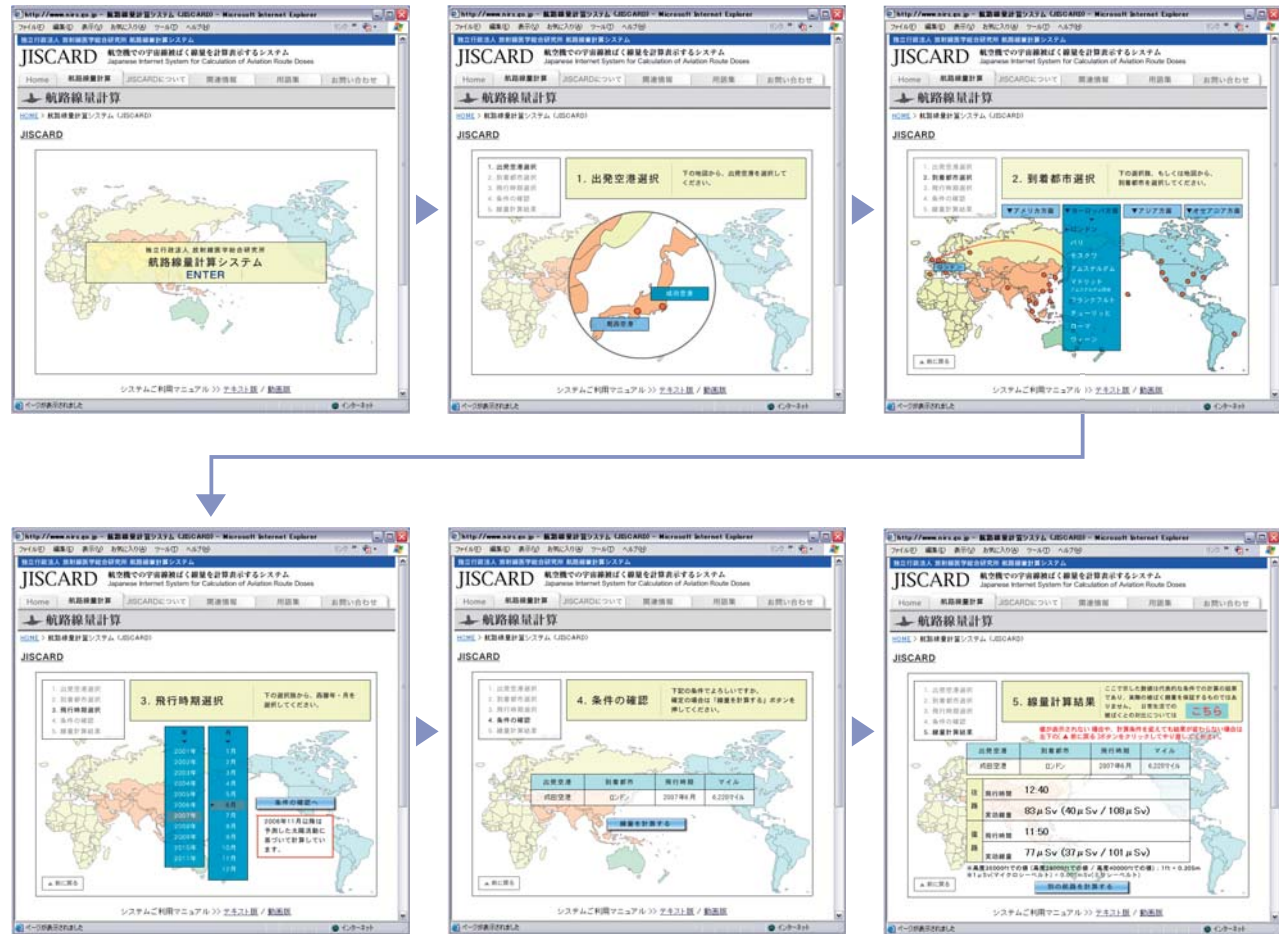


図2: 航路線量計算における一連の操作画面
出発空港、到着空港、飛行時期(年&月)を選択すれば、往・復それぞれの線量と飛行時間が表示される。

搭乗時期を画面上で選択するだけの簡便な操作により、代表的な飛行条件及び想定される最低/最高高度での線量値を直ちに得ることができます(図2)。日常生活で受ける被ばくとの対比についても確認できるようになっています。

お手元のPCが古い等の理由によりフラッシュ版のプログラムがきちんと動作しないことがあります。そのような場合でも航路線量計算ができるよう、動画を使わないテキスト版のプログラム「JISCARD Clif」も提供

しています。JISCARD Clifでは、空港名や飛行時期をプルダウンメニューから選んでいくことにより、フラッシュ版と同じ結果を手早く得ることができます(図3)。

さらに、空港や電車内等でも利用できるよう、携帯対応版「JISCARD Mobile」を用意しました。JISCARD Mobileでは、短い通信時間で効率よく必要な情報を得られるよう、ボタン操作をできるだけ減らし、シンプルな画面にする等の工夫をしました。図4にそのQRコードを示します。



図3: テキスト版航路線量計算システムの画面
プルダウンメニューで選択する。



図4: 携帯版システム
(JISCARD Mobile)のQRコード

JISCARDについて

「JISCARD について」のタブをクリックして現れるページには、線量計算の対象としている路線(空港)や、計算の条件・方法等についての説明を掲載しています。先述の航路線量計算で取り扱っている路線は、成田国際空港又は関西国際空港を起点とした、比較的日本人乗降客の多い世界35都市(アメリカ10都市、欧州9都市、アジア12都市、及びオセアニア4都市)への63路線(一部トランジット路線も含む)です。対象としている

期間は2001年1月から2011年12月までの11年間で、代表的な飛行条件に対して月ごとの平均的な線量を求めています。

なお、これまで航路線量の計算には、米国連邦航空局(Federal Aviation Administration)で開発されたCARI-6コード⁴⁾を使用していましたが、2008年9月に放医研で開発された新しいプログラム(詳しくは後述)による計算結果に置き換えました。

関連情報

「関連情報」のページには、航空機の巡航高度(11km)における日々の宇宙線強度のグローバル分布画像を二次元の濃淡マップで表示しています(図5)。宇宙線強度の計算は、地球磁場の宇宙線をはじく力(地磁気カットオフリジディティ)と太陽磁場強度のデータを入力パラメータとして、日本で開発された大気中宇宙線強度を迅速に計算する解析モデルを用いて1日毎(深夜0~2時)に自動で行っています。計算方法については次章で詳しく説明します。

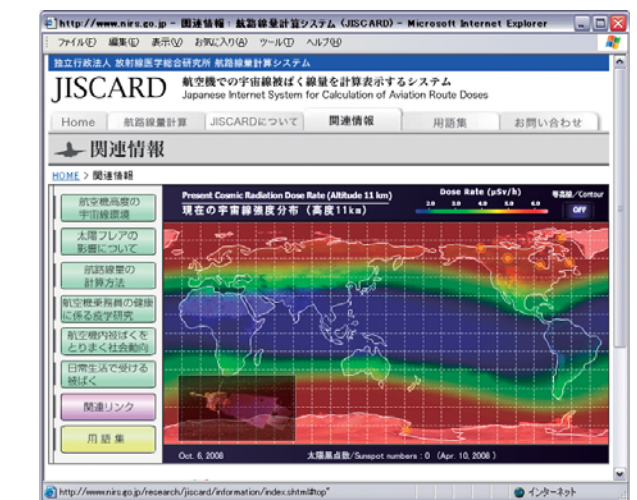


図5: 関連情報の画面
太陽黒点数の推移から予測した日々の宇宙線強度分布を更新表示している。地図上のマークをクリックすると各地のモニタの観測データを、人工衛星の画像をクリックすると米国の気象観測衛星GOESの観測データをリアルタイムに見ることができる。

その他、関連の情報として、宇宙線被ばくについての理解を深めてもらえるよう、以下の事項について解説しています。

- ・ 航空機高度の宇宙線環境
- ・ 太陽フレアの影響
- ・ 航路線量の計算方法
- ・ 航空機乗務員の健康に係る疫学研究
- ・ 航空機内被ばくをとりまく社会動向
- ・ 日常生活で受ける被ばく

また、「関連リンク」として、宇宙線環境などについて学ばせて役に立つと思われるウェブサイトを紹介しています。

用語集

「用語集」のページには、宇宙線被ばくに関する専門的な用語を選び、各用語について数行ずつの解説を記載しています。宇宙線関連の用語（GLE、太陽活動、地球磁場等）、放射線防護関連の用語（線量当量、実効線量、放射線荷重係数等）、その他一般的な用語（自然放射線、放射線審議会、リスク等）を広く取り上げています。今後も、利用者の方から頂いたご要望等を踏まえて、取り上げる用語の拡充や説明内容の改善に努めていきたいと考えています。

その他のプログラム・データ

「JISCARD Options」のページでは、航路線量の計算に関わりのある独自のプログラムやデータを提供しています。2008年10月現在、後述する汎用型の航路線量計算プログラム及び空港検索用のウェブツール、携帯対応版のプログラムに加えて、2つの画像情報を Google Earth 形式のファイルとしてダウンロードできるようにしています。1つは地磁気カットオフリジディティ、もう1つは航空機の巡航高度（11km）における宇宙線強度のグローバル分布です。後者の宇宙線強度分布を表示

する Google Earth 形式ファイルには、世界の主要な空港をプレースマークとして加え、各空港の位置（緯度、経度、標高）も併せて確認できるようにしています（図6）。

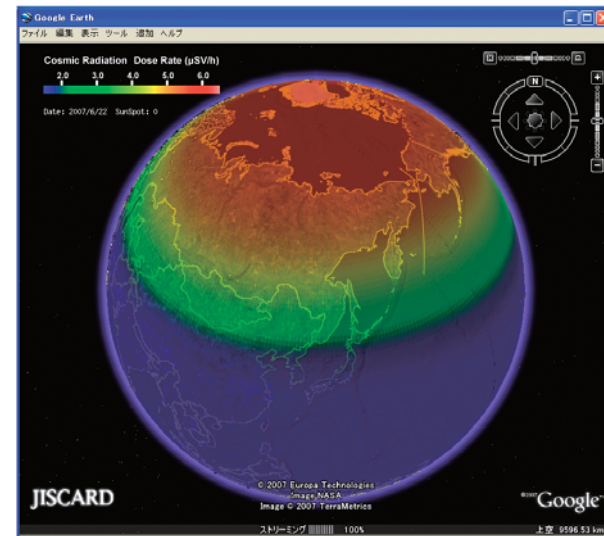
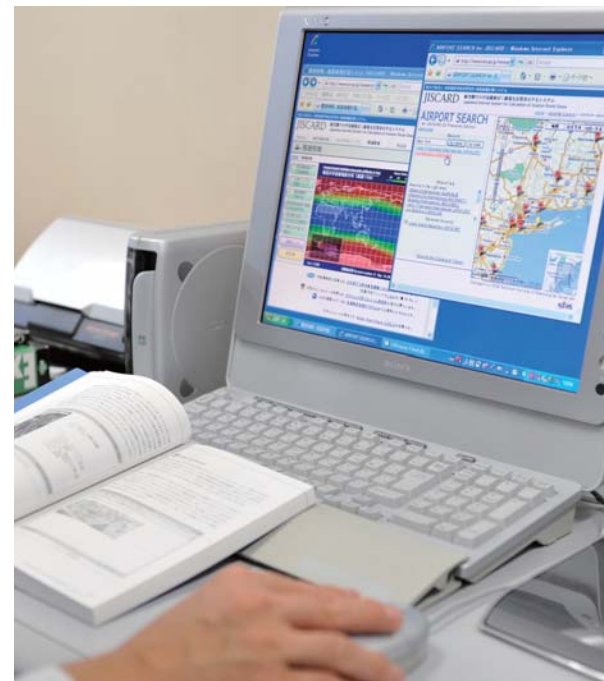


図6: JISCARDの拡張データとして提供している、航空機の巡航高度(11km)における宇宙線強度のグローバル分布画像のGoogle Earth対応版。太陽黒点数の観測データに基づいて日々計算・更新を行っている。



新しいプログラム「JISCARD EX Personal Edition」

先述の航路線量計算プログラムでは、日本発着の国際線63路線について代表的な飛行条件での被ばく線量値だけを提供しています。これに対して、利用者の方から、国内外の様々な路線に対して被ばく線量を計算できるようにしてほしいとの要望が何度も寄せられました。そこで、放医研では、国内外の任意に選んだ空港間での被ばく線量を簡便に計算できる新しいプログラム「JISCARD EX Personal Edition」を開発、2008年9月25日に一般向けに公開しました。

JISCARD EX Personal Edition（以下「本プログラム」という。）は、世界で広く普及している表計算ソフトウェア Microsoft® Excel® 上で動作するプログラムです。JISCARD のホームページ (http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/ex/index_ex.html) からダウンロードした Excel ワークブックのファイルを開き（図7）、航路データを入力して線量計算ボタンを押すだけの操作で、航路線量が精緻に計算されます。

航路データが手元にない場合でも、メインシートの「Airport Search on Web」ボタンを押して空港検索用のウェブプログラム「AIRPORT SEARCH」を起動し、

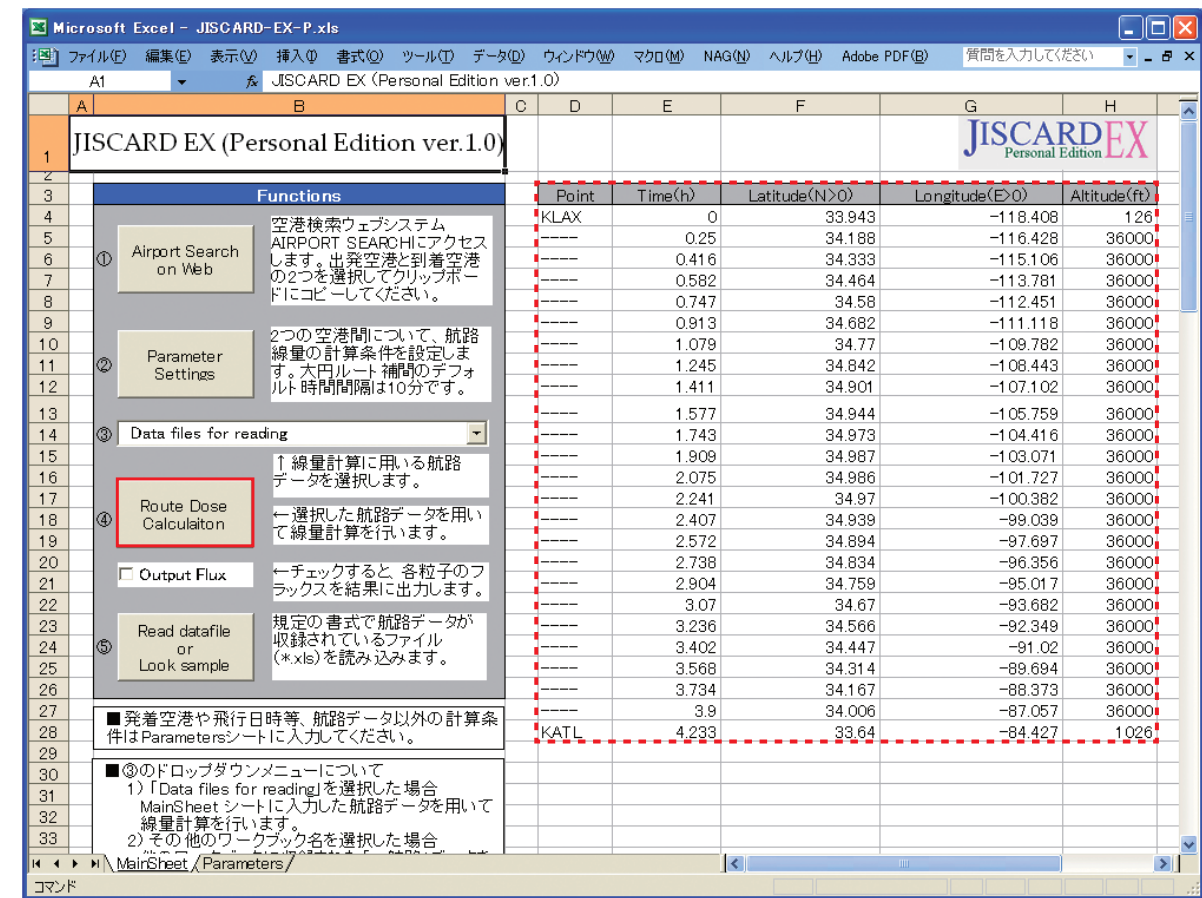


図7: JISCARD EXのExcelファイルを立ち上げると表示されるメインシートの画面。

Google Maps 上での簡単な操作で発着空港の位置情報を取得することができます(図8)。空港間の飛行時間も、大円軌道(球面上を直線で結んだ航路)の距離に基づいて自動的に算出します。

航路線量の計算結果はレポート形式のワークシートとして表示されます。線量率や飛行高度等の時間推移を現したグラフや、世界地図上に飛行航路をプロットした画像も自動的に作成されます(図9)。

大気中宇宙線強度の計算には、原子力機構が中心となって放医研と共同で開発した最新の大気圏内の宇宙線エネルギー分布に関する予測数学モデル「PARMA」⁵⁾を用いています。PARMAは、高エネルギー粒子に関して高精度でシミュレーションができるモンテカルロ計算コード「PHITS」による計算結果を基に、これと同程度の精度で、宇宙線を構成する中性子や水素原子等の粒子についてエネルギー分布の計算を短時間で計算できるようにしたものです。ちなみに、PARMAをベースにした



図8: 空港検索プログラム「AIRPORT SEARCH」の一画面。

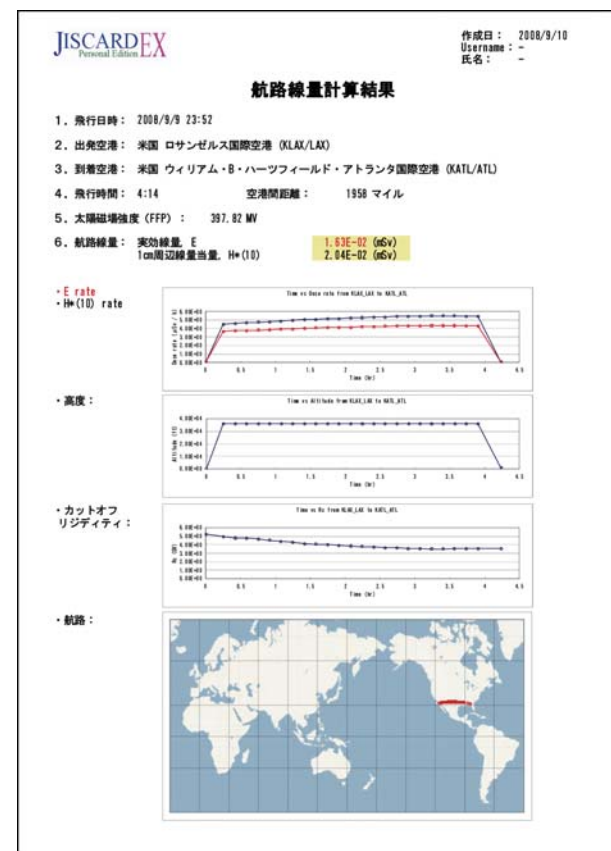


図9: 航路線量計算結果の出力シート画面
レポート形式で自動作成された結果が表示される。

大気中宇宙線強度計算用のプログラム「EXPACS」⁶⁾が原子力機構のホームページから提供されています。

地球に降り注ぐ宇宙線の量に影響を及ぼす太陽活動の変動については、地上の中性子モニタの観測データに基づき、太陽磁場の強さを表す Force Field Potential (FFP) を別途計算し、PARMAに取り込んでいます。2008年8月から2012年までの期間については、経験的なモデル⁷⁾で太陽黒点数の変動パターンから太陽磁場の変動を近似予測して値を与えています。この予測部分については、これからも適宜見直していく予定です。

地球に飛来する一次宇宙線の強度に影響を与える地磁気については、Bern大学の宇宙線グループの協力を

得て、高エネルギー粒子輸送シミュレーションに開発・提供されている GEANT4 ベースの地磁気計算コード「MAGNETOCOSMICS」の最新版(2010年まで保証)⁸⁾を使用して計算を行いました。その結果をデータベース化して PARMA に取り込み、宇宙線強度を計算しています。

また、本プログラムでは、ICRP が 2007 年の勧告⁹⁾で提示した新しい放射線荷重係数 (w_R) をいち早く線量計算に採り入れています。同勧告では、陽子の w_R 値が5から2に、中性子の w_R 値が全体に小さくなりました。航空機高度の宇宙線については、これら2つの粒子が実効線量に半分以上寄与するとされているため、新勧告に従って計算すると航路線量値は従来の値よりも小さくなります。

これまで JISCARD で用いてきた CARI-6 コードによる計算値との比較では、JISCARD EX によって計算

された線量値は、CARI-6 よりも 20 ~ 50% (平均で 30%) 小さくなります。両者による計算結果を比較した例を図10に示します。

その他、JISCARD EX の詳しい操作方法や利用規約等については、ユーザーズマニュアル (<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/ex/manual.pdf>) をご覧ください。

これからの展望

航空機の利用は国際的にますます拡がりを見せています。放医研が開発した航路線量計算システム (JISCARD) は、航空機の乗務員に限らず、仕事で頻繁に海外へ出張する会社員や妊娠されている女性など、宇宙線による被ばくに関心のある方が自分の受けた線量を知るために役立てられます。また、自然科学等を対象とした学習教育の一環として、放射線についての

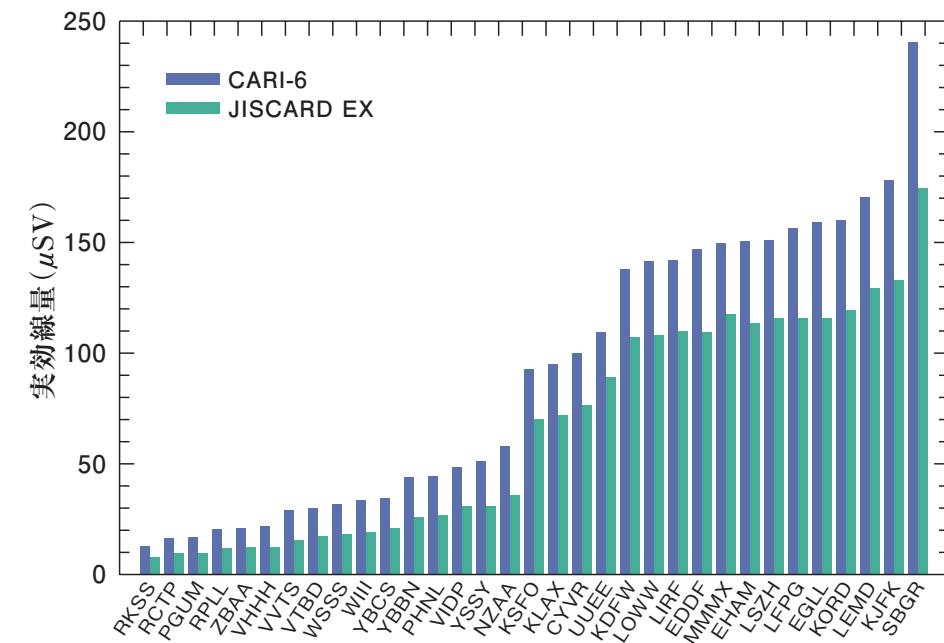


図10: 成田空港発着の国際線33路線について計算した航路線量値の比較
太陽活動極小期、巡航高度36,000ftの条件で計算している。JISCARD EXはCARI-6に比べて系統的に小さい値を与える。

理解を深める教材としても活用が可能です。

放医研では、今後も JISCARD の機能拡張や高度化に取り組んでいきます。機能拡張に関して最大の課題は、太陽フレアへの対応です。巨大な太陽フレアが発生すると数時間のうちに被ばく線量が大きく変化することがあります。現在の JISCARD には、そのような短時間の線量変化をリアルタイムに計算する機能はありません。もし巨大な太陽フレアが発生した場合には、宇宙線強度の変化を分単位で推定して、特定の飛行機について実際の航路・高度の推移に関する詳細情報を取り込んだ精密な計算が必要になります。その実現には、情報通信研究機構 (NICT) や日本原子力研究開発機構 (JAEA) をはじめとして、国内外の様々な研究機関や優れた研究者・技術者の協力が不可欠です。

また、高度で緻密な線量評価システムの開発にくじけず取り組んでいくには、利用者の方々から頂く声は何よりの励みになります。読者の皆様におかれましては、御感想や御意見などお寄せ頂ければ幸いです。その際は JISCARD の問合せフォーム (<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/contact/index.shtml>) をご利用ください。

最後に、JISCARD の開発・運用にあたっては、放医研広報課の皆様をはじめとして、数多くの方々にご多大なお力添えを賜りました。この場をお借りして関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 保田浩志: 航路線量計算システム (JISCARD), Isotope News 624, 9-12 (2006)
- 2) 航路線量計算システム JISCARD: 放射線医学総合研究所ホームページ (2008), <http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml>
- 3) 宇宙天気情報センター: 情報通信研究機構ホームペー

ジ (2008), <http://swc.nict.go.jp/pagerss/index.php>

- 4) CARI-6: Federal Aviation Administration (FAA), Radiobiology Research Team web site (2008), http://www.faa.gov/education_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/
- 5) Sato, T., Yasuda, H., Niita, K., Endo, A. and Sihver, L.: Development of PARMA: PHITS based Analytical Radiation Model in the Atmosphere, Radiat. Res. 170, 244-259 (2008)
- 6) Excel-based Program for Calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum (EXPACS): 日本原子力研究開発機構ホームページ (2008), <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>
- 7) Nymmik, R. A., Panasyuk, M. I., Pervaja, T. I. and Suslov, A. A.: A model of galactic cosmic ray fluxes. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 20, 427-429 (1992)
- 8) Cosmic-ray Group, Physikalisches Institute: University of Bern: web page (2007), <http://cosray.unibe.ch/~laurent/magnetocosmics/>
- 9) International Commission on Radiological Protection (ICRP): The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103, Pergamon Press, Oxford (2007)



国際機関活動報告

原子力の平和利用 (Atoms for Peace) としての “アイソトープと放射線技術の利用”

—国際原子力機関—

国際原子力機関ヒューマンヘルス部核医学課
渡邊 直行



渡邊 直行 (Naoyuki Watanabe)

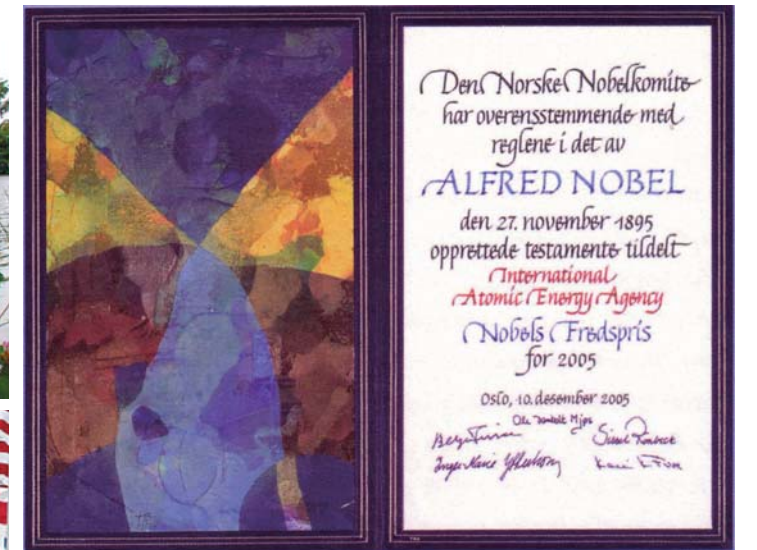


図1: IAEA本部 (ウィーン、オーストリア)

(左上) アルテドナウから見たIAEA本部: 筆者のオフィスは、左側から2番目の28階建A棟の、2002~2006年まで24階に、アスベスト除去作業の後、2007年から22階にある。(左下) IAEA加盟国の旗が翻る噴水広場: 2004年にボールが設置され、国連ニューヨーク本部のような国際色豊かな風景となった。(右) ノーベル平和賞: 2005年、IAEAはノーベル平和賞をエル・バラダイ事務局長とともに受賞する。賞状ならびにメダルはIAEA本部A棟とC棟の間の廊下の一面に飾られ、賞状が置かれているケースの背面には、2005年に在籍した全職員の名前が記されている。IAEAはその報奨金を、がん治療と母子保健に係わる特別奨学金給費生制度に使用し、各職員にはその賞状をデザインした感謝状を渡し、その慶びを分かち合った。

1.はじめに

原子力の平和利用の促進と軍事利用への転用を防止する国際機関として、2005年にノーベル平和賞をその事務局長 (Director General) エル・バラダイと共に受賞し、2007年に創立50周年を迎えた IAEA (International Atomic Energy Agency、国際原子力機関) (ウィーン、オーストリア) (図1) は、保障措置、技術協力、安全確保の活動を3つの柱としている。IAEAは、事務局長以下、管理局 (Department of Management)、原子力科学・応用局 (Department of Nuclear Sciences and Applications)、保障措置局 (Department of Safeguards)、原子力安全・セキュリティー局 (Department of Nuclear Safety and Security)、原子

力エネルギー局 (Department of Energy)、技術協力局 (Department of Technical Corporation) の6つの局から構成されており、約2300人の職員と145の加盟国を擁している (2008年10月29日現在)。一般には、とかく “核の番人” である保障措置局の活動が脚光を浴びているが、“Atoms for Peace” の精神の下に行われている、原子力発電分野以外での原子力技術の平和利用活動を担う原子力科学・応用局も世界的に活動を展開している。その予算は、IAEA一般予算総額455億6000万円のうち、約11%である50億1160万円が割り当てられている (2007年度)。ここでは、2002年10月より6年に亘り原子力科学・応用局に在籍する筆者が、この局の活動を紹介しながら、アイソトープと放射線技術の利用について述べる。

2. 原子力科学・応用局とその活動について

原子力科学・応用局は、(1) ヒューマンヘルス部 (Division of Human Health)、(2) 物理化学部 (Division of Physical and Chemical Sciences)、(3) 食糧・農業における核技術 FAO (国連食糧農業機関) / IAEA 共同事業部 (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture) の 3 部、(4) IAEA 試験施設 (Agency's Laboratories、サイバードルフ、オーストリア)、(5) IAEA 海洋環境施設 (IAEA-Marine Environment Laboratory、モナコ、フランス) からなりたっている。原子力発電分野以外での原子力の平和利用として、アイソトープならびに放射線技術の医療、農業、工業、水資源及び環境分野への応用を推進している。

外部の専門家から構成される原子力科学・応用の活動に係わる助言グループ (Standing Advisory Group on Nuclear Applications: SAGNA) に諮問しながら、各分野で、2 年毎のプログラムを策定し、そのプログラム下で選定されたプロジェクトを介して、アイソトープならびに放射線技術に係る活動を展開する。IAEA 内部トレーニングの 1 つである “Management Certificate Curriculum” を修了した職員がプログラムなどの策定に現在関与している。

IAEA 加盟国が抱えている問題を、アイソトープ及び放射線技術の応用により効率良く改善することを目的としたプロジェクトが生まれ、専門家会議 (Consultants Meeting) や調整研究プロジェクト (CRP) 活動により、その技術応用の妥当性が検討・検証される。

専門家会議は、外部より 5 名の専門家を招聘し、IAEA 会議担当官 (Scientific Secretary) と共に、プロジェクトに係る技術応用の必要性や可能性を検討し、その成果は、IAEA 技術報告書 (IAEA Technical Document: TECDOC)、IAEA ガイドライン、科学レビュー論文などとして公表される。また、よりグロー



図2: 技術会議
(上) 議長との打ち合わせ: 専門家側とIAEA側の双方の妥協点を探りあわなければならない時もある。(下) 会議最終日: なるべく皆がハッピーエンドになるように会議を調整する。

バルな視点での検討が必要な場合には、外部より最大 20 名程度の専門家を招聘して、技術会議 (Technical Meeting) を開催する (図 2)。

技術応用の妥当性の検証に欠かせないのが、調整研究プロジェクト (Coordinated Research Project: CRP) である。通常、1 つの CRP に 1 人以上の IAEA プロジェクト管理官 (Project Officer) が選任され、プロジェクト管理官は当該分野の外部の専門家らとともに専門家会議で具体的な研究活動計画を策定する。その研究プロジェクトへの参加者の公募後、書類選考された 10 カ国程度の発展途上国からの研究者たちと、同様な手続きにて選ばれ

た数カ国の先進国の専門家らの協力によって、2～3 年かけて研究活動を行う。研究活動開始前および終了時にそれぞれ研究者会議 (Research Coordination Meeting: RCM) が開催され、研究活動の確認とデータ解析などがそれぞれなされ、プロジェクトの最終成果は、科学論文、IAEA 技術報告書などの形で公表される。その成果は、技術協力局に提供され、国プロジェクト (National Project)、地域プロジェクト (Regional Project) や地域間プロジェクト (Interregional Project) を介して、加盟国へ実践的な技術として紹介されることとなる。この時、原子力科学・応用局より、技術協力局の各種プロジェクトへプロジェクト技術管理官 (Project Technical Officer) が選任され、技術協力局のプロジェクト管理官 (Project Management Officer) とともにプロジェクト管理に当る。CRP 活動と研究者会議は、原子力科学・応用局の事務局次長室にある研究契約管理課により管理され、その成果は、内部職員より構成される研究契約委員会 (Research Contracts Committee: RCC) にて評価される。また、CRP は発展途上国の研究者と先進国の研究者の交流場所ともなっている。2007 年現在、原子力科学・応用局では、71 の CRP 活動が認められている。

2-1 医療分野

各種疾病の診断や患者治療の改善を目的として、放射線医学の応用についてのプロジェクトを展開している。

(1) 医療用非密封性アイソトープを標識した放射性医薬品を用いる診断・治療の技術の普及を目的とする核医学プロジェクト、(2) X 線、ガンマ線、粒子線によるがん治療の技術を促進する放射線治療プロジェクト、(3) 放射線発生医療機器の精度管理の技術普及を目的とする放射線管理プロジェクト、(4) 分子生物学的手法による、細菌ならびに原虫の薬剤耐性検出技術や放射線による生物影響の研究に係るプロジェクトが実施されている。

また、疾患予防の観点から、乳幼児における栄養物質

の動態を検査し、その欠乏状態の改善を図る母子保健プロジェクトも実行されている。

近年、SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) / CT (Computed Tomography) や PET (Positron Emission Tomography) / CT (Computed Tomography) を用いた融合画像診断技術、さらに、分子プローブを用いた分子イメージング技術が導入され、より正確な病巣の性状把握とより適した治療法の選択を目的とした、分子診断プロジェクトが進められつつある (図 3)。

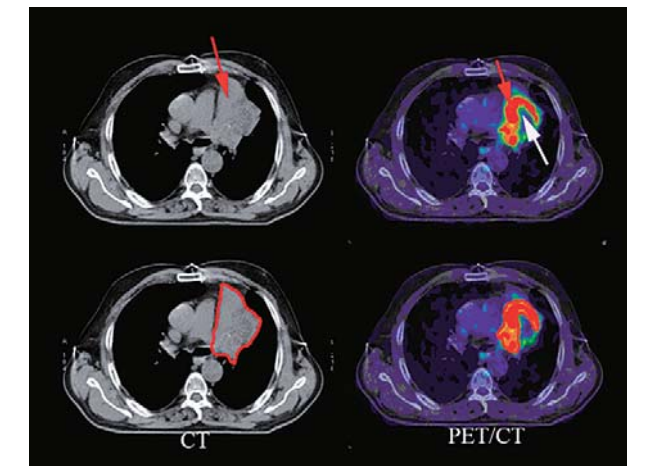


図3: 放射線治療計画のための F-18-FDG PET/CT による肺がん病巣の性状判定

CT 画像 (左側) では左肺に低吸収域を含む腫瘍陰影 (赤矢印) を認め、放射線治療時の腫瘍標的体積は赤い線で囲まれた領域となる。PET/CT では、Fluoro-18-fluoro deoxyglucose (F-18-FDG) の代謝画像より (右側)、腫瘍の部分 (赤矢印) とがんの可能性の低い部分 (白矢印) を明瞭に分けることができ、赤い線で囲まれた腫瘍標的体積は小さくなる。このような知見に基づき、現在、F-18-FDG PET/CT の放射線治療計画への応用を目的とするプロジェクトを準備している (渡辺直行, Isotope News 2007 年 4 月号)。

医療分野では、原子力科学・応用局の予算の約 25% が使用され、ヒューマンヘルス部で 28 の CRP が実施されている (2007 年度)。

2005 年、発展途上国でのがん患者の急激な増加に対応するために、包括的な対がん戦略プログラム (Programme for Action of Cancer Treatment: PACT) とそれを管理する PACT 室が原子力科学・応用局事務

局次長室内に組織された。現在、アルバニア、ニカラグア、タンザニア、スリランカ、ヴェトナム、イエメンの6カ国に対して6段階にわたる活動（Ⅰ：プログラムの必要性の評価、Ⅱ：活動の同意と枠組みづくり、Ⅲ：対がん戦略構想、Ⅳ：対がん戦略プログラム構築、Ⅴ：プログラム活動および到達目標の評価、Ⅵ：対がん戦略プログラムの継続的支援）を展開している。この活動は、外部の専門組織・機関の協力を得ながら、賛同国からの特別拠出金で運営され、その成果が待たれるところである。このプログラムの設立にあたりヒューマンヘルス部が中心となっていたが、最終的にはヒューマンヘルス部とは独立した組織となっている。しかしながら、通常予算や特別予算で運営されるヒューマンヘルス部や技術協力局と重なる活動が多々あり、プログラムの効果の短期測定が困難なために、その組織のあり方や運営方法などは今後検討されなければならない。

2-2 農業分野

商業価値の高い果物の生産性を低下させる原因となる害虫などを放射線照射し、不妊個体（雄）を繁殖させ大量に放出することで、その繁殖力を低下させる SIT (Sterile Insect Technique) プロジェクトが展開されている（図4）。この不妊虫放飼技術は、ツエツエバエへの応用で有名であるが、現在、マラリア原虫を媒介する蚊の不妊個体の放飼によるマラリア撲滅プロジェクトも進められている。

食品の殺菌や腐敗防止に放射線照射をする技術に関するプロジェクトより、1kGy までの低線量照射では、発芽防止、殺虫及び害虫の不妊化の効果が認められている。1～10kGy の中線量照射では食中毒防止、貯蔵期間の延長、菌数の低減、酒類の熟成促進など性質の改良。10kGy を超える高線量照射では患者用の無菌食や宇宙食のための完全殺菌に利用できる。薬剤の使用より安全でまた食品照射による毒性学的な恐れはないことが再確認され、食



図4：不妊虫放飼 (SIT) (IAEA NA Presentationより)
(左上) 不妊個体の大量飼育 (右上) 野生種と不妊個体のペアリングで次世代の子孫の数の減少 (下) 対象地域への飛行機での放飼

品の品質管理のための放射線照射技術が推奨されている。

また、作物収穫量を増加させるために、土壌の特性や植物品種の改良を行う必要があるが、(1) 中性子プローブで土壌の湿度を測定することで、作物生産に必要な灌漑水量および降雨保水量を管理するプロジェクト、(2) 熱帯性酸性土壌でしばしば見られるリン酸欠乏状態を改善する、費用対効果の良いリン酸石の化学・物理的特性のデータベース化による土壌管理プロジェクト、(3) 分子生物学的スクリーニング手法を加え、ガンマ線照射によって引き起こされる稲の突然変異株から、劣悪な環境にも耐えうる新品種の育成や、高品質・高収穫の米の生産を試みる放射線育種プロジェクト、が実行されている。

そして、家畜の生産性ならびに品質を高めるために、Carbon-14 を標識した各種栄養素の摂取状況を調査し、不足栄養素を食餌に補充する家畜管理プロジェクトが実施されている。

食糧・農業分野には、原子力科学・応用局の予算の約39%が割り当てられ、食糧・農業における放射線技術

FAO/IAEA 共同事業部と IAEA 試験施設により24のCRPが実施されている(2007年度)。

2007年にFAO(ローマ、イタリア)の外部評価委員会よりFAO/IAEA共同事業部のあり方に疑問が投げかけられ、現在検討中である。

2-3 工業分野

放射性医薬品生産と放射線加工について主にプロジェクト活動を行っている。

放射線医薬品生産では、(1) 各種疾病の診断・治療のために用いられる放射性医薬品を生産するための技術普及ならびに商品化支援プロジェクト、(2) サイクロトロンによりPET放射性医薬品を生産・品質管理に係るプロジェクト、が実施されている。

放射線加工では、(1) 放射線照射により生じたポリマージャカルが再結合によるポリマー繊維の劣化を防ぐ放射線加工プロジェクトが実施され、(2) 放射線照射による液状樹脂の固化を促進するキュアリングなどの応用なども検討されている。耐熱電線、収縮チューブやタイヤな



図5：アイソトープ技術を用いたダムへの漏水検査 (IAEA NA Presentationより)

どの製造に電子線などの放射線加工の導入で、原料の節約や生産速度の向上に寄与するという。

また、排煙中の亜硫酸ガス、窒素酸化物、ダイオキシンの処理に電子線照射技術の応用するプロジェクトが実施されている。

そして、構造物の非破壊検査技術として、ガンマ線やアイソトープ (Scandium-46) などの放射線を用いた分析法に係るプロジェクトも実施されている。

工業分野では、原子力科学・応用局の予算の約6%が使用され、物理化学部を中心に12のCRPが実施されている(2007年度)。

2-4 水資源分野

水質管理とその有効利用を目的として、(1) Radon-222などの放射性物質を地下水へ投与し、その動態を調査する技術を普及するプロジェクト、(2) ドナウ川—黒海域では放射性物質投与後、大気、河川、地下水のサンプル分析で、国を越えて地域的なレベルで水循環を解明しようとするプロジェクト、(3) ダムの安全管理技術の一つ

としてアイソトープ技術を用いるプロジェクト(図5)が実施されている。

水資源分野では、原子力科学・応用局の予算の約11%が使用され、物理化学を中心に4つのCRPが実施されている。

2-5 環境分野

(1) 環境放射能評価として Polonium-210 測定技術に係るプロジェクト、(2) メキシコシティーで大気中の揮発性有機物をプロトンでイオン化し測定するプロトン移動反応質

量分析技術を用いた大気汚染評価プロジェクト、(3) 地球温暖化の一因である二酸化炭素増加による海洋の酸性化が、海洋生物多様性に及ぼす影響を評価するプロジェクト、(4) 海産物の生体内毒素や cadmium の測定にアイソトープ技術を応用し海産食品の品質管理を目的としたプロジェクト、が実施されている。

環境分野には、原子力科学・応用局の予算の約 17% が使用され、物理化学部およびモナコ海洋海洋研究所で 3 つの CRP が運営されている (2007 年度)。

3. IAEA 協力センター (IAEA Collaborating Centers: IAEA CC)

原子力科学・応用局は、SAGNA の助言に従って、2004 年より、原子力科学・応用局のプロジェクト活動を無償でサポートする IAEA 協力センターの認定を始めた。2007 年現在、12 施設が認定され、任期は 3 年である。(表 1)。筆者は、これまでに、核医学分野の IAEA 協力センターである国立ソウル大学医学部核医学科と IAEA

表 1: IAEA 協力センター

施設・組織	国	分野	認定年月日
Institute of Nuclear Agricultural Sciences, Zhejiang University	中国	農業(植物繁殖・遺伝学)	2004年11月1日
Studiecentrum voor Kerenergie-Centre d'Etude de l'Energie Nucleaire	ベルギー	環境(環境放射線)	2004年11月25日
Department of Nuclear Medicine, Seoul National University College of Medicine	韓国	医療(核医学)	2004年12月8日
Sincrotrone Trieste ELETTRA	イタリア	工業(放射光)	2005年4月1日
National Food Investigation Institute (NFII)	ハンガリー	農業(実試料標準物質)	2005年7月20日
Animal Biotechnology Laboratory/Animal Science Department, University of Sao Paulo	ブラジル	農業(動物遺伝学・情報科学)	2005年8月24日
Philippine Nuclear Research Institute (PNRI)	フィリピン	環境(有害藻類研究)	2005年9月23日
National Institute of Radiological Sciences (NIRS)	日本	医療(低線量生物影響)	2006年1月23日
Syrian Arab Republic Atomic Energy Comission (AECS)	シリア	環境(環境放射線・標準物質)	2006年9月27日
Malaysian Nuclear Agency (Nuclear Malaysia)	マレーシア	工業(放射線加工)	2006年10月31日
Centro en Investigacion en Contaminacion Ambiental (CICA), University of Costa Rica	コスタリカ	農業(トレーニング)	2006年11月28日
Australian Nuclear Science and Technology (ANSTO)	オーストラリア	工業(中性子散乱を用いた機能性材料の物性研究)	2007年4月20日

トレーニングコースの開催、また加盟国への専門家派遣、専門家会議への専門家招聘を行ってきた。2006 年には、世界核医学会議(ソウル、韓国)の共催を行った。しかしながら、未だ試験期間であり、IAEA は効率的な活動を模索している段階である。

4. おわりに

原子力科学・応用局は、これまで、各種アイソトープならびに放射線技術の利用を検証し、加盟国へ技術提供を行ってきた。IAEA の活動では、保障措置や核のセキュリティ分野についてよく知られているが、原子力発電分野以外での原子力技術の平和利用を推進するという活動も盛んで、同局の活動は発展途上国を中心に多くの加盟国に、強く支持されている。しかしながら、これまではアイソトープおよび放射線技術の応用は、方法論が比較的簡便で、しかも検出感度が高いという利点が強調されてきたが、アイソトープや放射線以外の技術の発展に伴い、その長所が薄れつつある。今後、費用対効果(特にアイソトープの供給について)および放射線防護管理の観点から、アイソトープならびに放射線技術の普及の正当化がより強く求められることになるであろう。また、加盟国の非原子力発電分野での諸問題解決には、アイソトープおよび放射線技術を超えた包括的な対応が求められることが多くなってきており、IAEA 各部局を超えた横断的な活動や、WHO (World Health Organization、世界保健機関)をはじめとする他の国際機関と、そして、世界各地にある大学や研究所とのより積極的に密接な連携が必要になってくるであろう。

なお、筆者は 2008 年 10 月 29 日をもって IAEA への派遣任期を満了し、同月 30 日付で放医研企画部人材育成・交流課に復職いたしました。

参考文献

- 1) Annual Report 2007, 50 Years of Atoms for Peace, International Atomic Energy Agency.
- 2) Coordinated Research Activities, Annual Report and Statistics for 2007, International Atomic Energy Agency.
- 3) Watanabe, N., Jeremic B. (Ed.) IAEA TECDOC on The Role of PET/CT in Radiation Treatment Planning-For Cancer Patients Treatment, 2008 (in press).
- 4) Watanabe, N. (Ed) IAEA TECDOC on A Guide to Clinical PET in Oncology -Improving Clinical Management of Cancer Patients-, 2008 (in press).
- 5) Watanabe, N. (Ed) IAEA TECDOC on Clinical Application of SPECT/CT : New Hybrid Nuclear Medicine Imaging System, 2008 (in press).
- 6) Jeremic B., Watanabe, N. (Ed.) IAEA TECDOC on Criteria for Palliation of Bone Metastases -Clinical Applications, 2007.
- 7) 渡邊直行 放射線ならびにアイソトープ技術の応用 原子力 eye 日刊工業出版 2005 年、p.16-17.
- 8) 渡邊直行 Tracer 期待される SPECT/CT による融合画像診断 - 国際原子力機関専門家会議より - Isotope News 2008 年 8 月号
- 9) 渡邊直行 Tracer F-18-FDG を使用した融合画像診断装置 PET/CT による放射線治療計画時の照射範囲の決定 - 国際原子力機関 (IAEA) 専門家会議より - Isotope News 2007 年 4 月号
- 10) 渡邊直行 Tracer 核医学技師に携わる技師のための教育プログラム - 国際原子力機関 (IAEA) より - Isotope News 2006 年 4 月号

印象記

第7回放射線生物学に関する日仏ワークショップ

The 7th Japan-France Workshop on Radiation Biology

重粒子医科学センター
 粒子線生物研究グループ 細胞分子機構研究チーム 准研究員
 高橋 桃子



高橋 桃子 (Tomoko Takahashi)



概要

2年に一度日本とフランスを往復して開催されている「放射線生物学に関する日仏ワークショップ」の第7回目の会合が、2008年10月14日から16日の3日間にかけて放射線医学総合研究所（千葉県）推進棟大会議室にて行われました（写真1）。本会合は日仏間の研究交流と若手研究者の交流のためにフランス原子力庁の

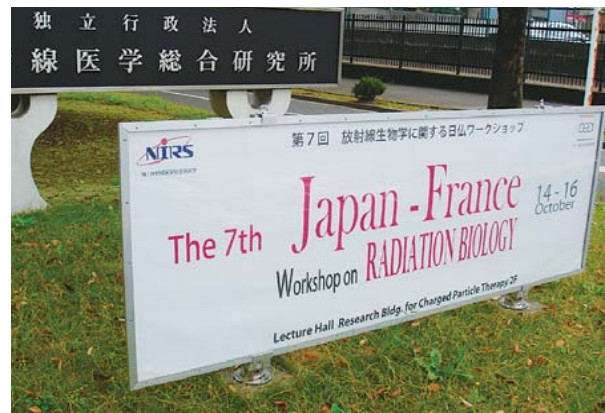


写真1:「放射線生物学に関する日仏ワークショップ」

生命科学局と放医研の間で10年以上に渡って開催されていますが、今回は放射線発がん、がん治療のための重粒子線、DNA損傷と修復、低線量影響、幹細胞研究、放射性毒理学の6つのセッションについて議論が交わされました。

1日目

1日目は放医研の米倉理事長、日仏双方の代表である岡安先生（写真2）とLegrain先生の挨拶の後、フランス大使館科学技術部のArmand氏と原子力部のCordier参事官（写真3）より挨拶がありました。記念写真撮影後のセッションでは放射線発がんに関して、フランス原子力庁のQuéméneur先生とChevallard先生、新潟大学の木南先生と放医研の丹羽先生から報告がありました。特にQuéméneur先生の発がんの機構を分子レベルから解析するための新規手法に関する発表、Chevallard先生のチェルノブイリ事故等に関連した放射線による前立腺

がんの発症に関する発表が印象に残っています。午後はがん治療のための重粒子線に関して、放医研の辻井先生と鎌田先生ならびに小西先生、東海大学の網野先生とフランス原子力庁のSabatier先生から報告がありました。Sabatier先生の報告はフランスにおいて欧州からの研究者を集めて重粒子線によるがん治療プロジェクトを開始する旨を含めた発表でした。放医研では既にHIMACによる重粒子線がん治療が行われており、辻井先生らの発表もそれに関するものでしたが、実際に治療が行われておりデータも蓄積されている点でHIMACでの重粒子線治療と研究は世界でも進んだものであることを改めて思いました。セッション終了後、推進棟食堂にて懇親会が行われ、自分も含めた日仏双方の研究者の間でよりよい交流が行われました。（写真4）。



写真2: 挨拶をする岡安隆一先生



写真3: 挨拶をするCordier参事官

2日目

2日目の午前中はDNA損傷と修復に関してフランス原子力庁のCharbonnier先生とRadicella先生、Lopez先生ならびにpeyroche先生、東北大学の小野先生と放医研の岡安先生、広島大学の田代先生から報告がありました。このセッションでは多くの新規の知見に関する発表と活発な議論が行われ、特にkeynoteスピーカーであるRadicella先生のDNA酸化損傷後の修復の話は、とても面白いものでした。午後は低線量影響に関して放医研の根井先生とVares先生、国立医薬品食品衛生研究所の能美先生、フランス原子力庁のSabatier先生から興味深い報告がありました。電離放射線または重粒子線を使用した際の低線量影響に関する報告のほか、Sabatier先生よりフランス原子力庁を中心とした低線量影響に関するプロジェクトについての報告があり、ヨーロッパでの低線量影響に関する研究の現状についての知識を得ることができ、研究を展開する上での参考となると思われました。

3日目

3日目の午前中は幹細胞研究に関して、大阪府立大学の児玉先生、放医研の王先生と蜂谷先生、フランス原子



写真4: 懇親会の様子

力庁の Pflumio 先生と Boussin 先生から報告がありました。放射線の幹細胞への影響については古くから研究がなされていますが、近年、腫瘍組織内において幹細胞様の特性を示すがん幹細胞に関する研究が注目されています。今回のセッションでは神経幹細胞、腸管由来の幹細胞の他に、白血病由来の幹細胞に関する研究報告があり、いずれも大変有意義な報告でした。午後は放射性毒理学に関して、フランス原子力庁の Lopez 先生、Quéménéur 先生ならびに Heulin 先生、放医研の武田先生と石井先生から報告がありました。電離放射線や重粒子線ではなくトリチウム、ウランなどの放射性物質の生物影響を中心としたユニークなセッションとなりました。

セッション終了後、会合の初めての試みとして、参加者・発表者によるディスカッションが行われました。「幹細胞」「DNA 損傷/修復、チェックポイント」「放射線発がん、低線量影響、放射性毒理学」の3グループに分かれて活発な議論が行われ、所要時間を超過するほどでしたが、それもあって有意義な議論が行われた模様です。また、議論の中で今後に向けた共同研究への足がかりも出来たようです。

まとめ

今回の会合では、フランス原子力庁を中心とした新規プロジェクトの発表が複数上げられたことが印象的でした。また、近年注目される「幹

細胞」をセッションのテーマとして取り上げたことも意義深いと思います。今回の会合では日本側・仏側双方の事情から通常の開催時期から約半年ほど遅れたこともあってか、放医研の参加者がやや少ないことが気になりましたが、今後の日仏双方の研究の発展と交流にとっても有意義な会合であったと思います。

Commissariat à l'Énergie Atomique (Life Sciences Division) フランス原子力庁 生命科学局
National Institute of Radiological Sciences 放射線医学総合研究所

第7回 放射線生物学に関する日仏ワークショップ

The 7th Japan - France Workshop on RADIATION BIOLOGY
14-16 October 2008

Lecture Hall Research Bldg. for Charged Particle Therapy 2F
放射線医学総合研究所 重粒子治療推進棟 2階 大会議室

Keynote Lectures:
 ■ Current status and future plans of carbon ion radiotherapy at NIRS H. Tsujii (NIRS)
 ■ Responses of base excision repair proteins to oxidative stress P. Radicella (CEA-IRCM)

Topics:
 ■ Radio-carcinogenesis
 ■ Heavy ions for cancer therapy
 ■ DNA damage and repair
 ■ Low dose effects
 ■ Stem cells
 ■ Radio-toxicology

事務局: 人材育成・交流課 kokusai@nirs.go.jp 043-206-3025
NIRS Education and International Cooperation Section
http://www.nirs.go.jp/

放射線の知識

中性子線照射に関する物理的な側面

(5) LETカウンターによる線質測定

基盤技術センター 研究基盤技術部
放射線計測技術開発室 主任研究員
高田 真志
放射線発生装置利用技術開発課 研究員 名誉研究員
平岡 武

1.はじめに

放射線には、X線から重粒子線までさまざまな種類とエネルギーがあり、同じ吸収線量でも生物影響が異なる。この異なる生物影響を比較するために、線質としてLET分布が用いられる。一般的に、X線、ガンマ線はLETが小さいので低LETといい、アルファ線、中性子線、その他の重荷電粒子、核分裂片はLETが大きいため高LETという。LET分布は、電離性放射線が物質中を通過する際に、飛程の単位長さあたりに平均して付与されるエネルギーであり、中性子、ガンマ線の間接(二次)電離放射線の場合には、反応により生成された二次電離放射線が物質中に付与したエネルギーに相当する。ここでは高LET放射線である中性子の線質(LET分布)を紹介する。

中性子の組織等価物質中でのLET分布は、マイクロシメトリ^{1,2)}の原理を利用したRossiが開発した組織等価型ガス比例計数管(Tissue Equivalent Proportional Counter, TEPC)を用いて計測される。

2.組織等価型ガス比例計数管(TEPC)

この検出器は、低い密度のガス中に付与されたエネルギー(E_g)から、荷電粒子がマイクロサイズの人体組織を横切った時のエネルギー付与(E_t)を計測する。荷電粒子が組織を横切った際に付与するエネルギー(E_t)は、粒子の質量阻止能($1/\rho \text{ dE/dx}$)_tに組織密度 ρ_t 、行路長 ΔX_t を掛け合わせたもので、 $E_t = (1/\rho \text{ dE/dx})_t \cdot \rho_t \cdot \Delta X_t$ で表せ、検出器内へのエネルギー付与も同様に、 $E_g = (1/\rho \text{ dE/dx})_g \cdot \rho_g \cdot \Delta X_g$ で表せる。検出器に封入されている組織等価ガスの阻止能は組織と等しいために、組織に付与されたエネルギーと同じエネルギー量を検出器から得るためには、 $\rho_t \cdot \Delta X_t = \rho_g \cdot \Delta X_g$ を満たせばよい。この式から、1/2インチ直径の検出器に、組織等価ガスを33 torrを封入すると、1ミクロン組織に付与さ

れるエネルギーを測定できることが分かる。マイクロシメトリで計測されるエネルギー付与の量は、線エネルギー(Lineal energy)と定義され、LETとは厳密には異なるが、両者を同一のものとして扱われる。線エネルギーは、球形の検出器に付与されたエネルギーを平均弦長(Mean chord length)で除したものである。球形の場合、平均弦長は $2/3 \times$ (球の直径)になる。

1ミクロン組織中のエネルギー付与を計測できる検出器の概略と写真を図1に示す。検出器ガス領域は、導電性の組織等価プラスチック(A150プラスチック)で囲まれた1/2インチ(12.7mm)直径の球であり、ガスを長期間保持するために、アルミニウムケースでカバーされている。荷電平衡を成立させるためには、検出器ガスと構成壁は同じ元素組成であることが好ましい。A150プラスチックは重量比、水素10.1%、炭素77.6%、窒素3.5%、酸素5.2%であり、封入されるガスは、プロパンベース組織等価ガス(重量比、水素10.2%、炭素56.9%、窒素3.5%、酸素29.3%)と、メタンベース(組織等価ガスは重量比、水素10.2%、炭素45.6%、窒素3.5%、酸素40.7%)の2種類が良く用いられる。ちなみに、ICRU組織(筋肉)は重量比で、水素10.2%、炭素12.3%、窒素3.5%、酸素72.9%とその他の微小元素から構成されている。検出器に33 torr(0.04気圧)の組織等価ガスを封じ込め、1ミクロン人体組織に付与されたエネルギーを計測する。ガス封入後、2-3週間以上、安定して動作する。この検出器のアノードは、ヘリカルコイルで巻かれ、ガス増幅領域の制限、容易な取扱が可能になっている。検出器には+550~+650Vが印加され、ガス増幅がなされる。検出器内部には、Cm244のアルファ線源が封入されており、ガスを封入したまま、アルファ線がガス領域に付与したエネルギーを用いて、検出器から得られる電荷量を付与エネルギーに校正できる。検出器には、得られた電荷を積分する、電荷積分型のプリアンプがつけられる。

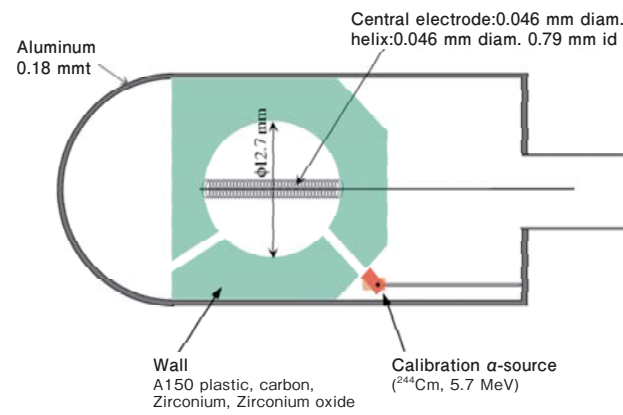


図1-(A): 検出器の概略図、計数ガス領域は直径1/2インチ(12.7 mm)であり、組織等価プラスチックA150で覆われている。



図1-(B): 検出器の写真

中性子により生成される2次粒子には、ガンマ線による電子、反跳された陽子、アルファ粒子、炭素、酸素、窒素の重荷電粒子があり、線エネルギーは0.1~2000 keV/ μ mの4.5桁に及ぶため、幅広いエネルギー領域を一度に計測しなければならない。この幅広いLET領域を3つに分けて計測し、解析時に1つの波高分布につなぎ合わせる手法が良く用いられる。他にはプリアンプで出力信号をLOG変換するものもある。

中性子場には、必ずガンマ線が混在する。もちろんTEPCはガンマ線にも感度を有するため、中性子とガンマ線の線エネルギー分布を同時に計測し、それぞれの寄与を弁別できない。しかし、上記のTEPCの検出器壁のみをA150プラスチックから炭素に変えた低圧ガス比例計数管は、中性子に対する反跳陽子生成感度を有しないために、ガンマ線のみ線エネルギー分布を計測でき

る。両ガス検出器を併用して、中性子とガンマ線の線エネルギー分布をそれぞれ計測できる。Cf252中性子源を両検出器で計測したときの頻度分布を図2に示した。細実線がA150プラスチック計数管、太い破線が炭素計数管で計測した頻度分布である³⁾。線エネルギー(Lineal energy, y)の0.1から10 (keV/ μ m)はガンマ線により生成された電子成分で、両計数管で同じ分布が計測されている。線エネルギー7から120 (keV/ μ m)は生成された陽子による成分であり、両計数管で大きな差異が生じている。陽子は主に検出器壁とガスに含まれる水素と中性子との弾性散乱反応と炭素、酸素、窒素との核反応(n,p)により生成される。両検出器の測定に差が生じるのは、炭素計数管に水素が含まれないためである。従来は、数keV/ μ mから15keV/ μ m領域は中性子とガンマ線が混在しており、両成分を分けることは出来ず、両粒子が分かれる境界を推測するしかなかったが、2つの計数管を組み合わせることで中性子とガンマ線をそれぞれ評価できる。150から400 (keV/ μ m)は検出器壁とガスに

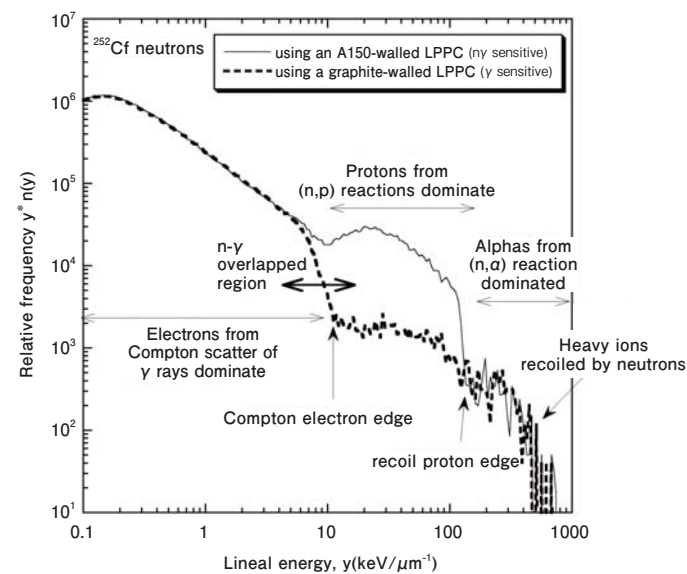


図2: 中性子とガンマ線をTEPCで比較計測したときの頻度分布³⁾ 細い実線がTEPCで計測した頻度分布、太い実線が炭素壁の計数管で計測した頻度分布である。

含まれる炭素、酸素、窒素との中性子核反応(n, α)反応により生成されたアルファ粒子、400から2000 (keV/ μ m)はガス構成元素である炭素、酸素、窒素が中性子により反跳された成分である。この100 keV/ μ m以上の線エネルギー成分があることから、中性子は高LET放射線と言われる。ガンマ線は20 keV/ μ m以上の線エネルギー成分は無いため、低LET放射線と言われる。

3. 中性子の線エネルギー分布(線質)

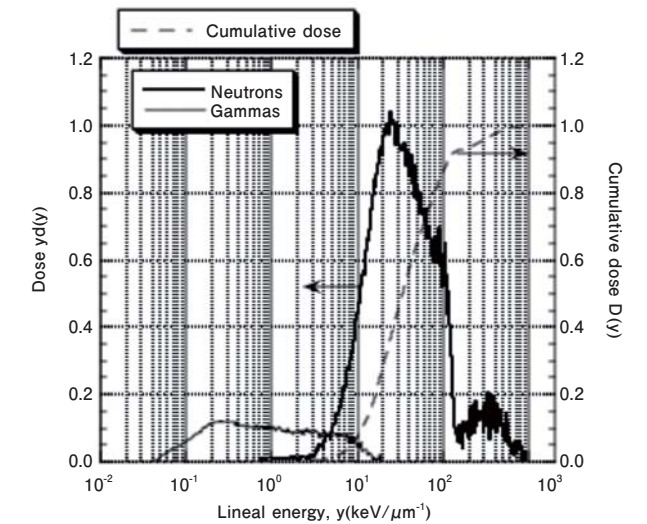
A. 中性子線源

AmBeとCf252中性子源から放出された中性子とガンマ線の線エネルギー分布(線量分布)を図3に示した。高い線エネルギーの成分が中性子、低いほうがガンマ線によるものである。両線源の中性子の線エネルギー分布は中性子エネルギースペクトルが似ているために、同じような分布であるが、ガンマ線の寄与がAmBeで21%、Cf252で58%と大きく異なる。中性子分布の1から120 keV/ μ mは中性子が検出器壁の水素を反跳したプロトンと炭素との核反応C(n,p)により生成されたプロトンであり、120から500 keV/ μ mは炭素との核反応C(n, α)により生成されたアルファ粒子が多くを占める。わずかな事象であるが、それ以上は検出器ガス中の炭素、酸素、窒素を反跳した成分である。線量分布のピーク(AmBeが22 keV/ μ m、Cf252が40 keV/ μ m)が異なるのは、中性子エネルギースペクトルの成分が異なるためである。中性子場の線質はしばしば、頻度分布、線量分布の平均値(\bar{y}_F , \bar{y}_D)、実効線質係数Qを代表値として用いられ、測定値から得られた値を表1に示した。

表1: 中性子線源の線質を表す代表値

中性子線源	頻度分布の平均値	線量分布の平均値	実効線質係数
AmBe	23.5 (keV/ μ m)	65.7 (keV/ μ m)	12.4
Cf252	31.2 (keV/ μ m)	59.9 (keV/ μ m)	14.2

(A) AmBe中性子線源



(B) Cf252中性子線源

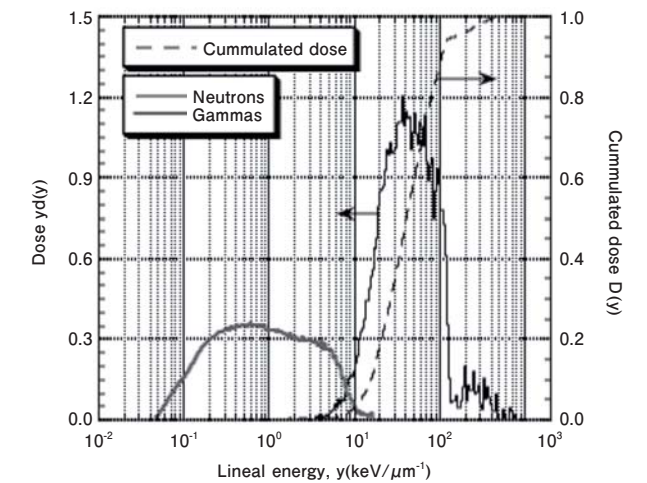


図3: 中性子とガンマ線の線エネルギー分布(線量分布)

B. 高速中性子

数100keVから15MeVまでの単色中性子の線質(線エネルギー分布)を以下の図4に示す。これは上記と同様の手法で、中性子とガンマ線を区別して、東北大学工学部高速中性子実験室(FNL)に設置された中性子標準場⁴⁾で実測したものである。図4の(A)250keV、

(B) 550keV、(C) 1MeV、(D) 5MeV、(E) 15MeV 単色中性子と付随して発生したガンマ線の線エネルギー分布（線量分布）が示してある。中性子のエネルギーが1MeVから15MeVに増加するにつれて、メインのピーク位置は減少する。これは、中性子により反跳された陽子のエネルギーの増加に伴い、その陽子の阻止能が減少するためである。数100keVから1MeVまでは、中性子エネルギーが炭素との核反応のしきい値よりも低いため、アルファ粒子が生成されず、120 keV/μm 以上の事

象は確認できない。2MeV以上になるとしきい値を超えるために、炭素との核反応により生成されたアルファ粒子の事象を確認できる。ガンマ線の線量は、数100keV中性子場で多くなっているのは、中性子生成に利用している核反応と入射ビームを止めるためのバック材から発生するガンマ線による。

図5に、0-150、150-400、400-2000 keV/μm の中性子エネルギー領域の中性子の線量の構成比の変化をプロットした。この構成比は中性子エネルギーで変化し、

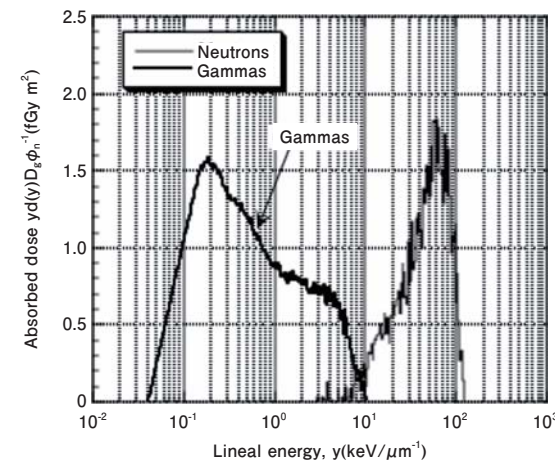
数MeV領域で大きく変化する。そのため、計測されたLET分布の成分構成比、図4の中性子成分のピーク位置の情報を組み合わせることで、中性子のエネルギー情報を推測することが出来る。

このように、照射する中性子エネルギーにより、線質が大きく変化する。中性子源の種類によりガンマ線の割合も大きく変化する。

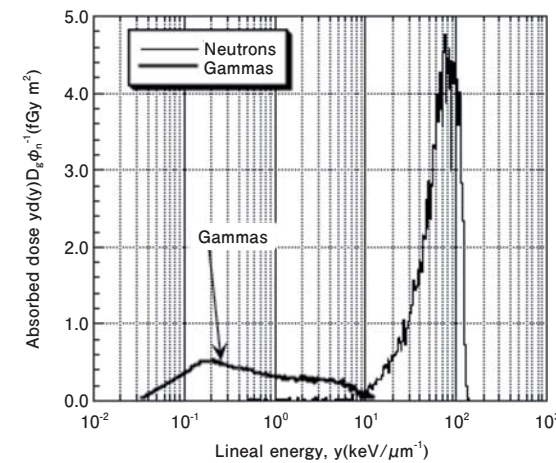
C.高エネルギー中性子

数10MeV中性子の線エネルギー分布を図6に示す。中性子源は、45MeV陽子を用いて、p-Li中性子生成反応により生成された準単色中性子である。この中性子場は、ガンマ線の線量が無視できるぐらい低い。A150組織等価プラスチックで作られた検出器壁の厚さは数mmであり、高エネルギー中性子により反跳された陽子の飛程は1cmに及ぶため、吸収線量を計測するための条件である荷電粒子平衡が成立しない。荷電粒子平衡を成立させるために、厚さの異なるA150で作られたビルドアップキャップをつけて計測した中性子の線エネルギー分布を図6に追加した。キャップが無いときの分布は赤い線、適切な厚さのキャップをつけたときが青い線、厚すぎる

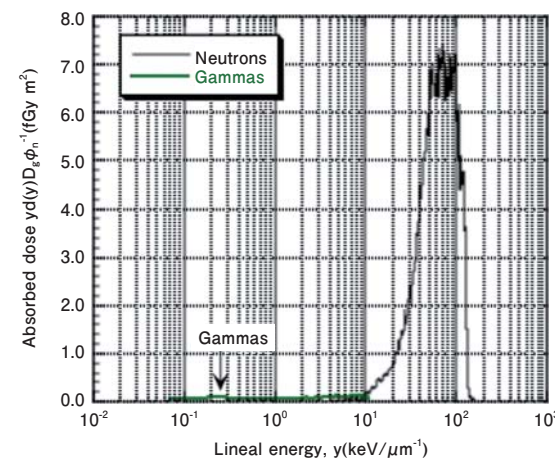
(A) 250keV中性子



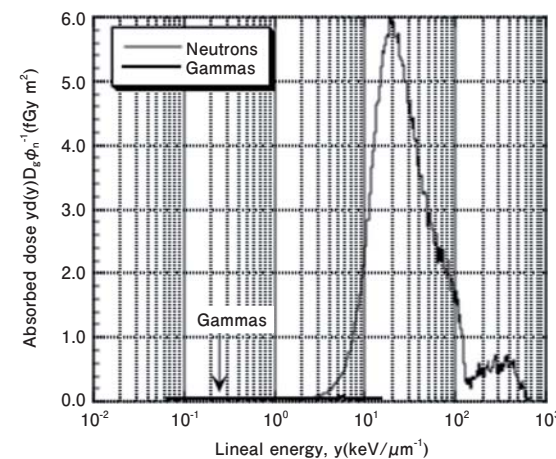
(B) 550keV中性子



(C) 1MeV中性子



(D) 5MeV中性子



(E) 15MeV中性子

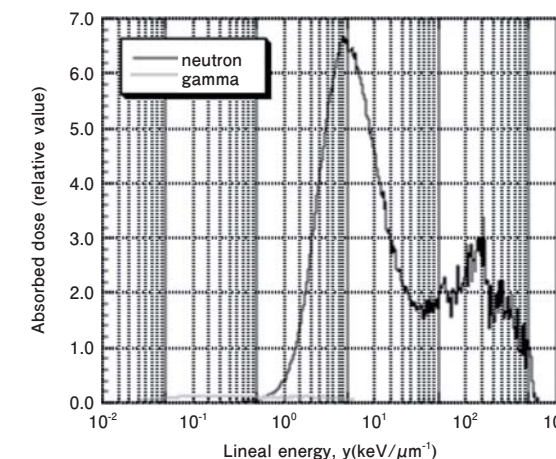


図4 高速中性子の線エネルギー分布（線量分布）³⁾

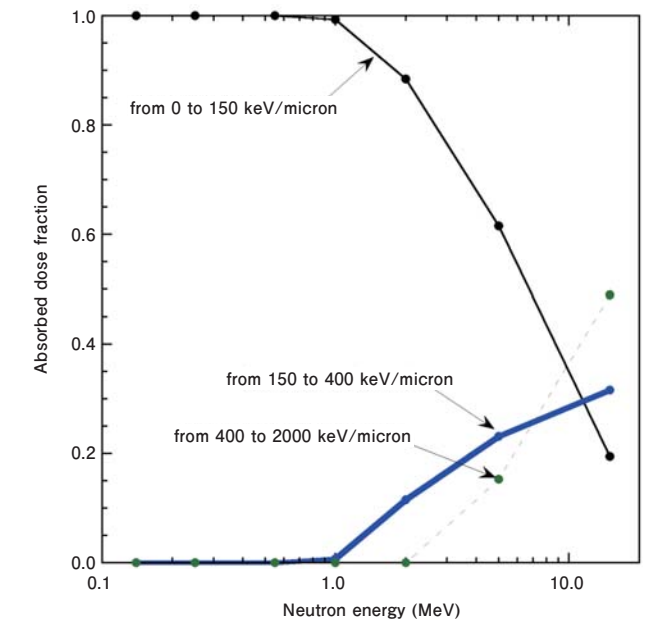


図5:各エネルギー領域(0-150, 150-400, 400-2000 keV/μm)の中性子線量の構成比の入射中性子エネルギーに対する変化³⁾

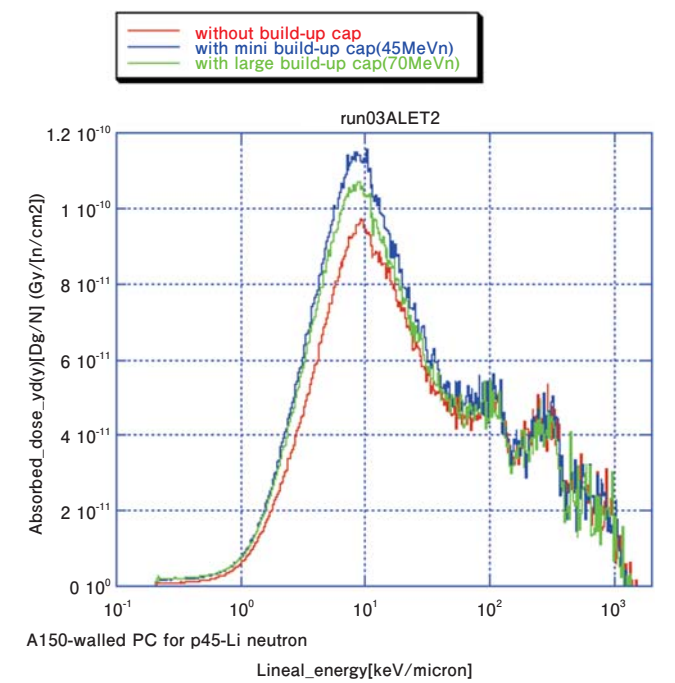


図6:p(45MeV)-Li中性子生成反応から発生した中性子の線エネルギー分布（線量分布）

キャップ (70MeV 中性子用) をつけたときの分布を緑色の線で示した。

ビルドアップキャップを付けない場合、荷電粒子平衡が成立しないために線量を過小評価しており、反跳陽子のピーク位置は高い値を示している。反跳陽子のピークは、8-9 keV/ μ m であり、高速中性子よりもさらに低い値になっている。キャップを付けることで正確な中性子の線量を評価でき、さらにキャップが厚くなると、中性子の物質中での散乱と吸収により、線量が減少している。80 keV/ μ m 以上の成分は高速中性子と比較し、かなり多くの割合を占めている。特に陽子 (120keV/ μ m)、アルファ粒子 (400 keV/ μ m)、反跳重粒子 (1000 keV/ μ m) の最大線エネルギーをエッジとして確認できる。この LET 領域の生成された二次粒子は、飛程が短いため、キャップの影響をほとんど受けず、変化が小さい。中性子エネルギーが高い場合には、物質によるビルドアップ効果と吸収をきちんと考慮する必要があり、それにより分布も異なる。

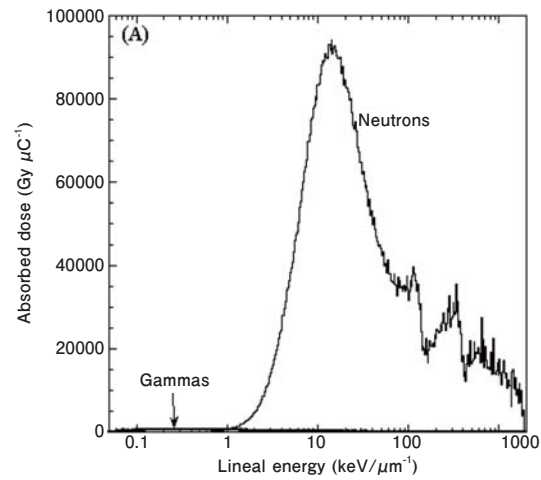
D.生物照射場

放射線医学総合研究所で行われた中性子の生物影響研究用に作られた中性子場 (d25MeV-Be 反応) の中性子線エネルギー分布 (線質) を、図7に示した。ガンマ線の線量は 1.8% と低く、他の中性子生物影響評価に用いられる中性子線源 Cf252 と AmBe と比較すると 1 桁以上も小さくなっている。高エネルギー中性子が発生しているために、120keV/ μ m 以上の高い線エネルギー成分も確認できる。この中性子場の代表値を表2に示す。生物照射用に頻繁に使用される中性子線源 (表1) と比較すると、頻度分布の平均は低いが、線量平均は 2 倍になっている。

表2: 生物照射用の中性子場の線質を表す代表値

中性子線量	ガンマ線量	頻度分布平均	線量分布平均	実効線質係数
144.6 \pm 9.6 (Gy/C)	2.66(Gy/C) (1.8%)	14.3 (keV/ μ m)	120.7 (keV/ μ m)	9.57

(A) 線エネルギー (線量) 分布の全体図



(B) ガンマ線の分布を見るために拡大した分布

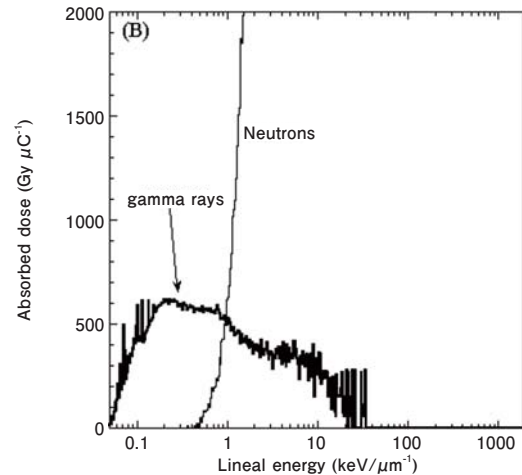


図7: 生物中性子照射場の線エネルギー (線量) 分布⁵⁾

線質係数は低くなっている。線量はビーム電流当たりである。このように中性子が生物中にどのようなエネルギーを付与しているのかを知ることができる。この線エネルギー分布と線エネルギーと RBE の関係から、中性子の RBE を物理計測から推測することも可能である。

4.ガンマ線の線エネルギー分布 (線質)

中性子場には必ずガンマ線が混在するので、ガンマ線の線エネルギー分布 (線質) を図8に示す。ガンマ線の分

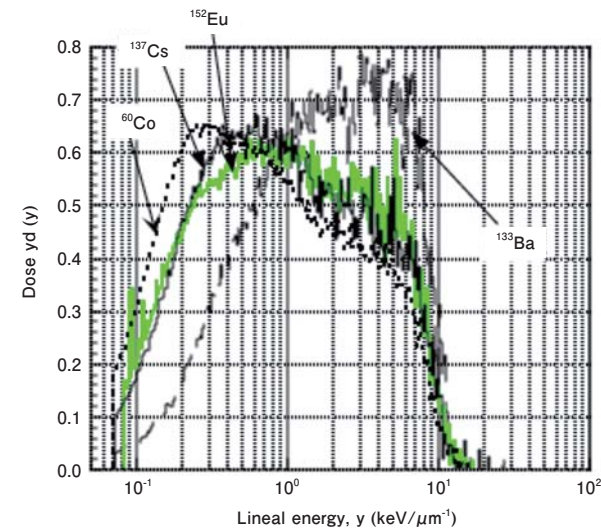


図8: ガンマ線の線質 (線量) 分布

布は、最大 20keV/ μ m まで及ぶが、中性子と比較するとかなり低い線エネルギーである。ガンマ線の分布も中性子と同様に、ガンマ線のエネルギーが高くなると、低い線エネルギーの成分が多くなり、逆にガンマ線のエネルギーが低くなると、高い線エネルギー成分が多くなる。これはガンマ線場のエネルギー情報を推測する上で参考となる。

5.LETカウンターの応用

現在はマイクロドシメトリーを基礎にした LET 検出器は、得られた線エネルギー分布から、直接、吸収線量、 $Q(L)$ 、 $Q(y)$ 関数を用いて 1cm 線量当量、実効線質係数を得られることから、放射線防護の分野に应用されている。例えば、遮蔽背後、宇宙ステーション内、航空機内の放射線場の計測、放射線治療の線質計測に用いられている。現在、細胞内の核よりさらに小さい DNA レベルのエネルギー付与を研究するための検出器の開発が、ナノドシメトリーとして行われている。

6.最後に

「中性子線照射に関する物理的な側面」に関して、全 6

回に分けて、紹介した。ここで取り上げた内容は中性子照射を行っている、これから行おうとしている生物研究者を対象としたものである。彼ら、彼女らの研究に役立てば幸いである。今回を持って、連載は終了するが、また別の機会に執筆をしたいと思います。長い間、付き合っていたいただき、どうもありがとうございました。

参考文献

- 1) H.H.Rossi and M.Zaider. Microdosimetry and Its Applications. pringer, 1996
- 2) International Commission on Radiation Units and Measurements, Microdosimetry, ICRU Report 36 (1983)
- 3) M.Takada, M.Baba, H.Yamaguchi and K.Fujitaka Differential neutron and gamma-ray absorbed dose distributions at the mono-energetic neutron calibration facility, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 114 (4), 481-490, 2005
- 4) Baba, M. Takada, M. Iwasaki, T. Matsuyama, S. Nakamura, T. Ohuguchi, H. Nakao, T. Sanami, T. Hirakawa, N. Development of monoenergetic neutron calibration fields between 8keV and 15MeV, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A376 115-123 1996
- 5) M.Takada, E.Mihara, T.Nakamura, T.Honma, K.Kono, and K.Fujitaka Neutron irradiation field produced by 25 MeV deuterons bombarding on thick beryllium target for radiobiological study, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, section A545(3) (3), 765-775, 2005



研究集会のお知らせ

放射線医学総合研究所 第3回放射線防護研究センターシンポジウム

放射線の人体への影響および障害の予防に関する研究は、放射線医学総合研究所の重要な社会的使命です。

この使命を果たすために、放射線防護研究センターでは、放射線影響の解明と、より合理的な規制への反映

をめざした研究を実施しており、これらをさらに効率的に推進するため、毎年シンポジウムを開催しています。本年度は「生き物はどのようにして放射線に立ち向かうのか」というタイトルを掲げ、12月16日および17日に開催いたします。放射線の有害作用に対して生体が有している能動的防御のメカニズムを理解することが、低線量放射線の防護に科学的裏付けを与える上で非常に重要であるとの認識に立ち、特に「DNA損傷応答と適応応答」を中心に議論いたします。小松賢志先生（京都大学）および松本英樹先生（福井大学）をはじめ14名の所外著名研究者をお招きし、進展著しい機構面の研究動向と今後の見通しについての情報交換を行い、一層の研究促進を図りたいと考えております。また、同時に放射線防護研究における機構研究の役割についての新たな理解につながればと考えております。多くの分野の方々のご来場をお待ち致しております。

NIRS (独)放射線医学総合研究所

第3回 放射線防護研究センターシンポジウム

生き物はどのようにして放射線に立ち向かうのか

- DNA損傷応答と適応応答 -

<p>第1日目 9:20 ~ 18:00</p> <p>(1) DNA損傷認識・シグナル伝達 菅澤 薫 (神戸大学) 高田 稔 (京都大学) 加藤 宝光 (放医研) 安井 明 (東北大学)</p> <p>特別講演 小松 賢志 (京都大学)</p> <p>(2) DNA損傷修復 I 松永 司 (金沢大学) 中別府 雄作 (九州大学) 増田 雄司 (広島大学)</p> <p>(3) DNA損傷修復 II 小野田 眞 (放医研) 勝部 孝則 (放医研) 武田 俊一 (京都大学)</p>	<p>第2日目 9:30 ~ 17:15</p> <p>(4) 細胞レベルの放射線適応応答 立花 章 (茨城大学) 柿本 彩七 (放医研・東京理科大学) 谷田 文夫 (理研) 鈴木 雅雄 (放医研)</p> <p>(5) 個体レベルの放射線適応応答 Guillaume Vares (放医研) 月本 光俊 (東京理科大学) 米澤 司郎 (元大阪府立大学) 大塚 健介 (電中研)</p> <p>特別講演 松本 英樹 (福井大学)</p>
---	--

日時：平成20年12月16日～17日
場所：放射線医学総合研究所 重粒子治療推進棟

主催：(独)放射線医学総合研究所
参加費：無料
事前申込：不要
TEL: 043-206-3024 FAX: 043-206-3061
E-mail: kokukou@nirs.go.jp URL: http://www.nirs.go.jp

<p>放射線医学総合研究所 第3回 放射線防護研究センターシンポジウム</p>	<p>日時：2008年12月16日(火)～17日(水) 主催：独立行政法人放射線医学総合研究所 後援：社団法人日本アイソトープ協会/日本放射線影響学会/日本保健物理学会 特定非営利活動法人日本分子生物学会 会場：放射線医学総合研究所 重粒子治療推進棟 2F 大会議室 参加費：無料</p>
---	--

編集後記

本号では、普段は影に隠れてやや見えにくい領域にスポットライトを当てることになりました。被ばくと聞くと、多くの人は原爆や原子力事故をまず想像されると思います。また、職業被ばくとしては原子力関連労働者の被ばくが話題になりがちです。しかし、近年まで余り意識されることはありませんでしたが、航空機搭乗中の宇宙線による被ばくは、職業被ばくとして大切な問題です。特集では、この問題を解説すると共に、一回の路線毎の飛行による被ばく線量を一般の人でも簡単にわかるようにした新たなホームページを紹介していただきました。また、国際機関活動報告では、IAEAの紹介をしていただきました。IAEAというと、北朝鮮等での検査を思い浮かべる人が多いと思いますが、著者が紹介しているように、放射線利用の推進も大きな柱として行われています。これから、益々重要になる活動だと思われます。放医研も現在、IAEAの協力センターとなっており、これらの活動に協力しているところです。

放射線科学では、これからも広い範囲の話題を取り上げて参りますので、引き続きご愛読頂きますよう宜しくお願いいたします。(HT)

次号予告

特集 「前立腺癌の重粒子線治療」
-これまでの成果と将来構想-
重粒子医学センター病院
辻 比呂志

最近の成果 1) 土壌小型節足動物トビムシ (*Folsomia candida*) における放射線応答遺伝子のスクリーニング
放射線防護研究センター 環境放射線影響研究グループ
中森泰三

2) 食肉用家畜の肉質の生体検査方法について
-今年度新しく査定された特許-
分子イメージング研究センター 先端生体計測研究グループ
池平博夫、他 2名

編集委員会

委員長 酒井 一夫	金澤 光隆	石井 伸昌
委員 内堀 幸夫	小橋 元	立崎 英夫
白川 芳幸	菊池 達矢	鈴木 敏和
高田 真志	長谷川純崇	杉森 裕樹
玉手 和彦	神田 玲子	
加藤 博敏		
事務局 岡本 正則		



▲旧雲長類実験棟跡地に咲いた石路の花

放射線科学

第51巻 第11号
2008年11月15日発行

編集・発行

独立行政法人 放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉市稲毛区穴川4-9-1
電話 043(206) 3026 Fax.043(206) 4062 Eメール info@nirs.go.jp
http://www.nirs.go.jp

(禁無断転載)



<http://www.nirs.go.jp>