

会議のトピックス(V)

DOE 主催の GNEP 核データに関するワークショップ

日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム部門

石川 眞

ishikawa.makoto@jaea.go.jp

原子力基礎工学研究部門

久語 輝彦

kugo.teruhiko@jaea.go.jp

1. はじめに

米国政府は大統領の提唱に従って、高速炉サイクルの新生構想である GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) を、今年初頭から本格的に立ち上げています。図 1 がその発端となった演説の様子です。エネルギー省 DOE は、この一環として、GNEP のために今後取り組むべき基盤技術の研究開発の実施内容について、9 月中旬にとりまとめる予定です。このために 7 月末から 8 月にかけて、GNEP を支援する 3 つの基盤研究分野 (核燃料サイクル、核データ、シミュレーションコード) に関するワークショップ (以下、W/S) が連続して開催されました。

本報告は、この 2 番目に開かれた米国エネルギー省 (DOE) 科学局配下の原子核物理室 (NP)、次世代科学計算研究室 (ASCR) 及び原子



Advanced Energy Initiative



"A secure energy future for America must include more nuclear power."

President Bush addressing the National Small Business Conference April 28, 2005



"So tonight I announce the Advanced Energy Initiative -- a 22 percent increase in clean-energy research at the Department of Energy to push for breakthroughs in two vital areas. To change how we power our homes and offices, we will invest more in zero-emission coal-fired plants; revolutionary solar and wind technologies; and clean, safe nuclear energy."

*President Bush in his State of the Union Address
January 31, 2006*

図 1 ブッシュ大統領の GNEP 演説 (by Kovar 氏)

力局(NE)の共催による「先進燃料サイクルのための原子核物理及び計算科学 W/S (Nuclear Physics and Related Computational Science R&D for Advanced Fuel Cycles Workshop)」にオブザーバーの資格で参加し、先進核燃料サイクルにおける米国の核データへのニーズ、及び共分散を含む核データ研究の現状、さらに GNEP における今後の協力の方向性を調査した結果をご紹介します（なお本 W/S で議論された話題は非常に多岐にわたったため、ここでは、出張者の専門に直接関連する項目（核データ R&D へのニーズ、及び評価済核データライブラリ）に内容を絞ります。本 W/S 全体の資料は、ANL の公開 HP (<http://www-fp.mcs.anl.gov/nprcsafc/>) にありますので、必要に応じて参照ください）。

2. GNEP 核データに関する W/S の概要

本 W/S は、核データ研究の分野に対する GNEP からのニーズを整理し、必要な研究開発項目を提言するために開かれたものです。2007 年度のこの分野への DOE（新規）予算として、計 243 万ドル（GNEP 全体予算の約 1%）を要求しているようです。本 W/S ではまず全体会合が開かれ、GNEP 構想の紹介、及び核データに関する 4 つの観点（①核データ R&D へのニーズ、②核データ測定及び施設、③評価済核データライブラリ（共分散を含む）、④核物理理論）から、サマリートーク及び質疑が行われました。引き続いて、上記の 4 つのテーマに分かれてグループ討議を行った後、再び全体会合を開いて、今後必要な研究開発項目の提言が各グループから行われましたが、特に、核データ共分散・感度解析手法の開発の必要性がいたるところで強調されていたことが注目に値します（GNEP の目的の一つである MA 核種の核データについても報告はありましたが、やや定量的な具体性に欠けていました）。

会場で配布された本 W/S 参加登録者のリストによれば、米国内の主要な大学や国立研究所の研究者、政府関係者などの約 140 名が載っていますが、150 人以上収容可能な広い会場がぎっしり埋まっていたことから、夏休みシーズンにもかかわらず、大部分は実際に参加していたものと思われます（2004 年 9 月にサンタフェで開かれた核データ国際会議 ND2004 の核セッションで主導的な役割を果たしていた大物達を多くみかけました）。たぶん、日本以外の海外からの参加者はおらず、また米国民間人も非常に少なかったようです。

2.1 全体会議での報告

(1) 核データに関する本 W/S の目的

まず DOE の Kover 氏から、「本 W/S の目的は、GNEP（または Advanced Fuel Cycle (AFC)、これらの用語は本 W/S ではほぼ同義で使われていました）を支援するために、核データに対するニーズは何かを明らかにし、研究開発計画を検討し、どこかの測定施設が利用可能かを議論し、核データ研究に必要な計算科学及びリソースを明確にすることである」

と説明がありました。本 W/S で合意された R&D 提案は、DOE の NP と ASCR への報告書として、9 月中旬に提出されるということです。

質疑の中には、若い研究者に魅力あるものとするべきである、大学には何を期待するのか、などがあり、会場に集まった研究者には、GNEP に関する今回の動きをきっかけとして、核データの基盤研究を盛り上げようという意図があることが強く感じられました。これに対して、グループ討議終了後の全体会合で、DOE の偉そうな方(ご自分で bureaucrat と名乗っていた)から、「核データは、熱流動など他の技術分野に比べると現在でも十分な精度があるのではないかと、GNEP にとって数グラムの臨界量の差が本当に重要なのか」と、やや牽制するような発言もありました。なお、GNEP では LLFP は消滅するのかわどうか質問したところ、LLFP はユッカマウンテンに保管するのみであり、核変換はしないとの回答でした。

(2) 核データへの R&D ニーズ

最近、OECD/NEA の場 (WPEC の SG (Subgroup) 26) で、GEN-IV の核データニーズ及び核設計目標精度に関して精力的な活動を行っている ANL の Salvatores 氏から、先進燃料サイクルにおける核データニーズについて、一時間近くに渡る基調講演がありました。内容は、NEA での活動とほぼ同様であり、感度係数と核データ共分散により、核設計パラメータ (臨界性、ドップラー反応度、ボイド反応度、出力分布など) の現状設計精度を評価すること、その分析から精度向上に重要な核種・反応を抽出することです。Salvatores 氏はここでも、ライブラリに依存せず、エキスパートジャッジにより作成した「談合共分散」の使用を主張していましたが、その後の会合や会場での議論を聞いた結果、LANL、ORNL、BNL など米国の主要核データ研究者からは賛同をほとんど得ていないことが分かりました。やはり、共分散を評価するには、核データ研究者がきちんとした方法論で解析評価する必要があるとの認識でしょう。また Salvatores 氏は、核データ測定と臨界実験などの積分実験がお互いに補完的な役割を果たすべきであるとし、OECD/NEA の炉物理実験ベンチマークプロジェクト IRPhE の重要性に触れましたが、これは JAEA としては完全に同意できます。

なお、彼が提唱している高速炉の目標精度の一覧表を図 2 に示します。まだ、完全には合意できてはいませんが、上記 SG26 に参加している JAEA の意見も一部反映されています。また、この設計目標精度を達成するためには、炉定数調整が絶対に必要となるのではないかと質問したのに対し、「ライブラリの調整はミニマムにしたい」とあいまいな回答でした。JAEA の経験では、臨界性 $0.3\%\Delta k$ (1σ) などは、炉定数調整を行わない限り無理なので、まだ、共分散による設計目標精度の裏付け解析が終了していないのであろうと理解しました。

Fast Reactors Performance Target Accuracies (1 σ)
(as defined within an international working group of the OECD-NEA)

PARAMETER	Q _n ^T TARGET ACCURACY (1 σ)
Multiplication factor (BOL)	0.3% $\Delta k/k$
Peak power (BOL)	2%
Power distribution	3%
Control rod worth (element)	5%
Control rod worth (total)	2%
Burn-up reactivity swing	0.3% $\Delta k/k$
Breeding gain	0.02
Coolant void reactivity coefficient (BOL)	7%
Doppler reactivity coefficient (BOL)	7%
Beta effective	5%
Major nuclide density at end of irradiation cycle	2%
Other nuclide density at end of irradiation cycle	10%

図 2 高速炉の核設計精度目標 (by Salvatores 氏)

(3) ENDF/B-VII ライブラリの現状

BNL の Oblozinsky 氏が、世界の注目を集めている ENDF/B の最新版の現状を報告しました。図 3 にその内容を示します。最初に米国の核データライブラリ開発の概況がまとめられましたが、中心となっている米国の CSEWG (Cross Section Evaluation Working Group) の予算は 900 万ドル/年であるようです (日本とはやはり桁が違います)。ENDF/B-VII は $\beta 2$ 版が今年の 4 月に公開され、6 月に CSEWG でレビューを受け、若干の調整の後、11 月に公式公開されるということです。収納核種は 387 で、前版よりは約 60 増

ENDF/B-VII: Contents of the library

- **General purpose library:** Reactor design, advanced fuel cycles, waste transmutation, nonproliferation, national & homeland security, nuclear medicine, shielding, physics facility design, ...
- **Contents:** 14 sublibraries (2 - new, 7 - many improvements, 5 - unchanged)

No.	Sublibrary	Materials in B-VII	Materials in B-VI	Comment
1	Photonuclear reactions	163	-	New sublibrary
2	Photo-atomic	100	100	Taken from VI.8
3	Radioactive decay	3830	979	New evaluations
4	Spontaneous fission yields	9	9	Taken from VI.8
5	Atomic relaxation	100	100	Taken from VI.8
6	Neutron reactions	387	328	Many new evaluations
7	Neutron fission yields	31	31	Taken from VI.8
8	Thermal neutron scattering	20	15	Some new evaluations
9	Standards	8	8	New evaluations
10	Electro-atomic	100	100	Taken from VI.8
11	Proton reactions	48	35	Some new evaluations
12	Deuteron reactions	5	2	Some new evaluations
13	Triton reactions	3	1	Some new evaluations
14	He-3 reactions	2	1	Some new evaluations
	Full library	4812	1709	

図 3 ENDF/B-VII ライブラリの内容 (by Oblozinsky 氏)

えています。共分散については、これまでの評価で今回使えるのは、Gd や Th など計 22 核種しかなく、今後整備していくとのことです。先進燃料サイクルのために強調された R&D テーマは、①MA (Np、Am、Cm) の核データ測定と評価、②主要重核種 (Pu-239、U-235、U-238) の高速エネルギー領域での捕獲断面積、そして③共分散データの整備でした。

(4) GNEP のための核データと共分散

LANL の核データ研究リーダーである Chadwick 氏は、まず MA 核種の核データについて、いかに実験データが不十分であるかを指摘し、その不確定性が大きいことを ADS の燃焼反応度の比較図を引き合いに出して強調しました。また、GNEP の目標の一つである核変換に関して、捕獲断面積の理論及び測定研究が必要であるとしました。さらに、不確かさの定量化については、まだ共分散評価の方法論を開発する段階であるとしましたが、ここでは特に、LANL の Kawano 氏が JENDL 作成の中で開発した KALMAN コードと BNL が開発した EMPIRE コードの活用に言及しています。

2.2 Group A : 核データ R&D へのニーズ

(1) ERANOS システムによる感度及び不確定性解析

ANL の Salvatores 氏が、仏国 CEA で開発した高速炉用核特性解析システム ERANOS の感度解析機能を報告しました。Salvatores 氏は、今は ANL 及び CEA の身分でオピニオンリーダーとして活躍していますが、70 年代には、燃焼感度解析理論の創始者であるイタリア Gandini 氏の共同研究者でした。ERANOS の感度解析基礎式は、臨界性と反応率については JAEA と同じですが、反応度については、摂動前後の k_{eff} に対する感度係数の差から求めており、JAEA のように一般化摂動理論を直接には用いていないようです。燃焼感度（燃焼組成変化、燃焼反応度）については、燃焼チェーンに対する感度計算法は同じですが、中性子束及び随伴中性子束を介しての効果についての説明はありませんでした。また、CEA が提唱している「類似性因子 (representative factor)」についても紹介があり、会場からこれをどのように設計で使うのかとの質問がありましたが、あいまいな答えでした。積分実験解析結果をどのように設計に反映するかという点について、あまり詰めた検討を行っていない印象でした。また、議論が核データ誤差に起因する設計精度への影響についてのみであり、解析モデル誤差について全く触れていないのも気になるところです。

(2) GNEP のための核データニーズのまとめ

Group A の議長を務めた LANL の Cappiello 氏が、本 Group のまとめを作成し、全体会議で報告しました。R&D ニーズとしてあげられたものは、ENDF/B-VII に付属する共分

散データ、アクチニド核データの高精度化 (Minor と Major の両方。U-235 捕獲共鳴領域の再評価は、JAEA のコメントで特に入った)、ライブラリと共分散を処理するツール、感度解析ツール開発などです。

2.3 Group C : 評価済核データライブラリー (共分散を含む)

(1) GNEP のための核データと共分散

LANL の Chadwick 氏が、Group C のサマリーを全体会議で報告しました。まず、注目すべきは、この結論が Salvatores 氏の発表、すなわち GNEP からの核データへの R&D ニーズに答えるという、極めてユーザー指向なものになっていることです。ここでの、トッププライオリティは、「共分散の開発」に置かれました。炉心設計での共分散の必要性を認識し、OECD/NEA の WPEC での活動と連動して、米国の核データ測定、評価、理論、積分実験の豊富な知識を世界で活用すべきと言い切っています。彼らの共分散開発の提案は、1) 2007 年末までにラフな共分散評価を ENDF/B-VII の全ての核種について行うこと (ENDF/B-VII.0 と呼ぶ)、かつ NJOY コードに共分散処理の機能を付け加えること、2) 2008~2009 年により詳細な共分散を重要なアクチニド核種 (MA を含む) について評価すること (ENDF/B-VII.1)、3) 2010~2015 年にかけて、包括的な核種を含んだ新しい ENDF/B-VII.2 を作成すること、である。「ラフな共分散評価とはどういう意味か。GNEP には透明性・説明責任が不可欠であり、共分散評価には王道はないはずである」と質問したところ、簡略ではあるが、技術的にはきちんとした評価を行うつもりであると、Oblozinsky 氏 (及び会議後 Kawano 氏) から回答がありました。Salvatores 氏が NEA の場で合意しようとしている談合共分散を使うつもりはないようです。

共分散以外の、その他の R&D 項目には、以下のものがあげられました。

- Pu-239 の熱及び中速エネルギーでの臨界性改良、
- Pu-239 の捕獲断面積 — Salvatores 氏からの、1keV 以上で 8%以下の精度要求、
(Kawano 氏によると現時点では、10~15%ではないかとのことです)
- U-235 の捕獲断面積 — 100keV 以下で 10%以下。非弾性散乱断面積の再評価、
- Am-242m の核分裂と捕獲断面積、Am-241 の捕獲断面積、(n,2n)反応など、
- Cm-244 と Cm-245 の断面積、
- 核データ評価のためのコード、核分裂理論モデル、
- 崩壊データ、遅発中性子、 γ 線生成、など。

(2) MA 核種の誤差低減

LANL の Kawano 氏が、MA 核データ評価の現状を報告しました。まず一般に、MA 核データには精度の良い実験データが少なく、理論計算に頼る傾向が大きいことが確認された上で、Am-241、Am-242m の核分裂断面積、Am-241 の捕獲断面積、(n,2n)断面積を再

評価し、ENDF/B-VII に格納した結果が報告されました。ここで用いた Bayesian 評価手法は、GNEP で必要な核種にも適用できるし、共分散データも同時に生成できますが、今後優れた核反応モデルの開発もまた不可欠であることが、結論として述べられました。なお Kawano 氏によると、Cm 等の他 MA 核種の評価は来年予定しており、Cm に対する目標としては、楽観的ではあるが核分裂で 30%、捕獲で 20%とのことでした。

(3) ENDF/B-VII の共分散データ

ANL の Smith 氏が、ENDF/B-VII における共分散データの現状を報告しました（ここでは、ENDF/B-VII.0 とタイトルにあり、近いうちに必ずバージョンアップする決意のようです）。この報告によると、ENDF/B-VI.8 にはファイル数（MF-31、32...など）で、755 個の共分散が格納されていたが、精査した結果、ENDF/B-VII に引き継ぐ価値・品質をもつもの（When in doubt...leave it out!）は、32 個しかなかった（しかも GNEP で重要な核種はほとんど含まれていない）とのこと。これについては、そんなに捨てるのはもったいないとの声がありましたが、共分散では品質を優先する必要があるので、やむを得ないとの回答でした。また OHP の中で、共分散は全て「reality test」をパスしなければならないし、数学的要求（positive definite のことか）を満たさなければならないとあるのも、彼らの考える「品質」の内容をうかがわせます。

(4) 共鳴領域の共分散評価コード SAMMY

ORNL の Nancy Larson 氏（SAMMY コードの開発者）はまず、測定された断面積データはドップラー効果などにより真実のものとは違っておりまた相互に相関があることから、理論計算による「核データ評価」が不可欠であることを強調しました。この理論解析を共鳴領域について行う世界標準コードが SAMMY であるとのこと。新しい実験データを用いた評価を行えば自動的に共分散データも得られますが、昔の実験で新しい解析ができない場合は、仮想的な実験データ（統計誤差や系統誤差を含む）を、共鳴パラメータから Bayesian 解析で推定する retroactive 法を用いて共分散を得るそうです。ORNL はこの方法を用いて、現在 Pu-239、Pu-241、Mn、K、U-235 などの共分散（断面積と共鳴パラメータ）を評価中とのこと。

(5) BNL と LANL による共鳴領域の共分散評価

BNL の Rochman 氏が、両研究所の共同による共鳴領域の共分散評価手法の開発報告を行いました。ここで主体となるのは、Kawano 氏が開発した KALMAN コードの recursive data processing アルゴリズムです。図 4 に、その流れ図を示します。これまでに、約 20 個のテスト計算を終わっています。この手法では、SAMMY Retroactive 法に比べると、共鳴ピーク間で相対誤差が大きく評価されていました。MCNP によるベンチマークや ORNL

のモンテカルロ法による TSUNAMI システムからのフィードバックにより、手法の改良につなげたいとのことでした。今後、Salvatores 氏が主導する NEA の WPEC/SG-26 ("low fidelity" covariance project) に共分散データを提供する予定とのことでした。

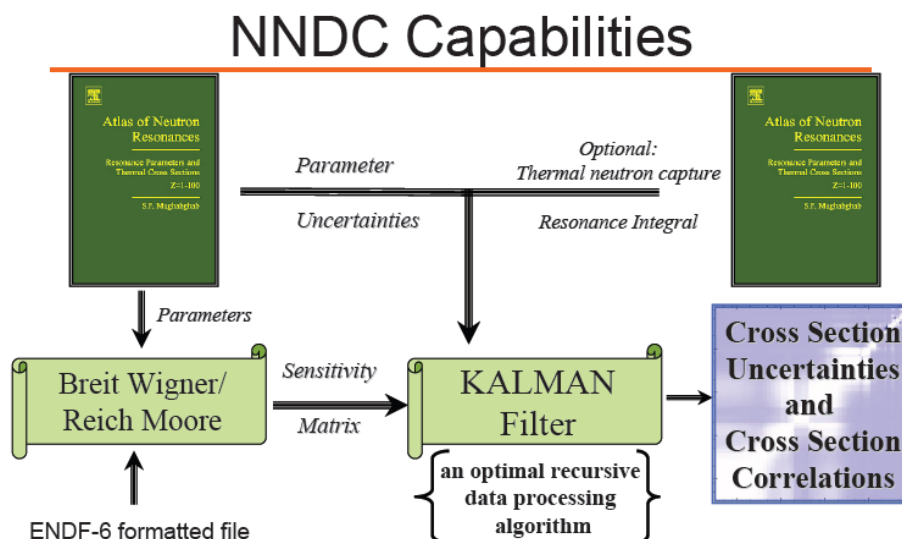


図 4 BNL と LANL による共分散評価システム (by Rochman 氏)

(6) BNL と LANL による高速エネルギー領域の共分散評価

BNL の Herman 氏が、両研究所の共同による高速エネルギー領域の共分散評価手法の開発報告を行いました。ここでは、上記の共鳴パラメータに対する操作を OMP（光学モデルパラメータ）に対して行うようです。全断面積では、実部ポテンシャル深さが最も重要なパラメータであると指摘していました。

(7) 国際協力と共分散の計画

BNL の Oblozinsky 氏が、現状をまとめました。OECD/NEA の WPEC では、共分散に関して、SG20（共鳴領域の共分散、リーダーKawano 氏）、SG24（高速エネルギー領域の共分散、リーダーHerman 氏）、SG26（新型炉への核データニーズ、リーダーSalvatores 氏）、SG27（共鳴領域の共分散処理、リーダーDunn 氏）などが国際協力で行われています。DOE の科学局には、2.3 (1)に示した ENDF/B-VII の共分散開発計画を申請しており、開発資源は、2～4 名の Full time 研究者、1～2 名のポスドク、初期 75 万ドル～後年度 150 万ドル／年の予算とのことでした。

(8) 積分検証と品質保証

LANL の Kahler 氏が、国際臨界安全ベンチマーク（ICSBEP）を使っの ENDF/B-VIIβ2

ライブラリの検証結果として、216 のベンチマークの k_{eff} の C/E 値は 0.9964～1.0036 の範囲にあることを報告しました。これは、研究機関として LANL、Petten、CEA などと複数クロスチェックした結果であり、ライブラリの処理の検証も兼ねたものであるとのことですが、臨界性だけの議論であるので、炉心設計のための積分検証としてはやや物足りません。また、核データへの要求につなげるための系統的な分析が望まれると感じました。

(9) ZPR/ZPPR 実験への ENDF/B-VII β 2 版の性能

ANL の McKnight 氏が、ICSBEP に含まれている高速臨界実験装置 ZPR と ZPPR のベンチマークデータ (26 個) を用いて ENDF/B-VII β 2 ライブラリの検証を行った結果を報告しました。 $+3.8\%\Delta k$ (ZPR-6/10) などの悪い結果について一部の核種のライブラリを取り替えるなどの検討を行っていますが、あまり洗練された分析内容には見えませんでした。

3. まとめ及び所感

本 W/S に参加する前は、今回の GNEP 構想で予算が棚ぼた式に降ってくることで、米国の核データ研究者が浮かれているだけではないかと危惧していましたが、本 W/S での核データ研究者達の報告及び質疑は非常にまじめなものであり、GNEP 炉心設計側のニーズを把握し、それに何とかして応えようという真摯な態度が全体に感じられました。夏休みシーズンであるにもかかわらず、米国の国立研究所の主導的研究者が大部分そろったこともその意気込みの現れであると思われます。

しかし R&D ニーズを出す炉心設計または炉物理側は、ANL (及び CEA) の Salvatores 氏の OECD/NEA の WPEC での議論を基にした報告だけであり、会場での発言も少なく、かなり見劣りがしました。GNEP で建設する Advanced Burner Reactor (ABR) の基本設計スペックが、冷却材種別や MA 添加量も含めて何も決まっていないのでやむを得ないのかもしれませんが、MA 核データに対するニーズなども定量的には何も提示できなかったのは、本 W/S の趣旨からすると不満です。ANL で用いる感度解析ツールは、CEA が開発した ERANOS システムを輸入して間に合わせることや、IAEA の高速炉反応度誤差に関する研究プロジェクト (CRP) に米国からの参加が無くなったこと、また核設計誤差のうち炉心解析モデル誤差に関する議論が全く無かったことなどを考え合わせると、米国では現在、高速炉心設計や炉物理のポテンシャル (人材、ツール整備) は、非常に落ち込んでしまっているのではないかと推定されます。

これに対して、核データ研究側は、炉心の核設計精度を論理的に説得力をもって評価するためには、核データ共分散の整備が不可欠であることを、非常に良く認識していました。核データや炉物理の会議で、これほど感度解析や不確定性評価の議論があちこちでなされたのは初めてではないかと思われます。BNL の研究者が、「従来の素性の分から

ない過去の共分散はほとんど捨てて、新たに、ENDF/B-VII の共分散を 2007 年末までに全ての核種について一通り整備し、さらに 2010 年までには重要核種については設計に使用できるレベルとする」と宣言していましたが、米国なら本当にやってしまうかも知れないと感じました。この国が、ベクトルの方向をそろえた時のすさまじい実行力は、すでに数多くの歴史が証明していると思うからです。(石川記)

8 月半ばの時期に、多くの米国の研究者が集まり、熱心な議論により物事を進めていく光景が米国流のやり方として非常に印象的でした。一旦物事を決めると、スピーディな展開で次々とことを進めていくさまに、行政を含め米国の推進力の強さを垣間見た気がします。

本 W/S では核データ側の主導で課題の玉出しがなされたためか、ユーザー側から核データへのニーズがアピールされていたとは言い難く、少し肩すかしを食った気がしました。共分散をはじめ核データを整備する機運が高まっている中で、ユーザー側から核データへの要求を明確化していくことが、必須の要点であると感じました。

個人的には、今回の W/S に参加して、核データ評価の大御所を初めて目にすることができるとともに、核データ評価の最近の実態に触れることができ、非常に貴重な体験ができたことをありがたく思っています。(久語記)



GNEP 核データ W/S の様子

会議終了間近の写真なのでやや空席が見られますが、開始時はぎっしりでした。