

## 核子入射による核破砕反応ベンチマーク ワークショップに参加して

### Second Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions

高エネルギー加速器研究機構

岩瀬 広

[Hiroshi.Iwase@kek.jp](mailto:Hiroshi.Iwase@kek.jp)

#### 1. ワークショップ概要

2010年2月8日から11日にかけて、フランス CEA サクレイ研究所で行われた第2回核破砕反応ベンチマークワークショップ (Second Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions) に参加した。核子入射によるさまざまな核破砕反応の測定値を対象に、モンテカルロコードで使われる代表的な核モデルを検証するワークショップである。第1回が2008年に開催され、途中2回の小会合を経て今回で4回目の会合となる。欧州

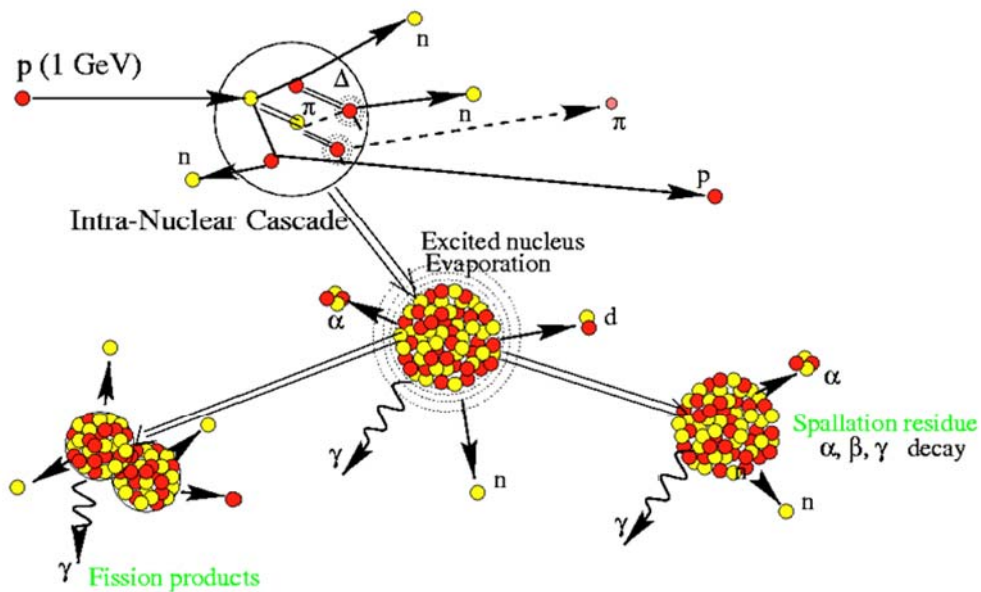


図1 核内カスケード計算体系

の研究者が主体となって行っている比較的小規模な活動で今回の参加者はおよそ 25 人、実験屋と理論屋両方が来ていたがその割合は 3:7 程度であった。前者の代表が今回世話人の Leray 女史、後者は ISABEL の Yariv 氏、INCL の Cugnon 氏、CEM の Mashnik 氏などである。日本からは IAEA の大塚氏と筆者が参加した。

## 2. 会場所感

CEA サクレー研究所はパリの南オルセーという街にある。オルセーはパリ郊外と言われるが、電車で行くとパリの街がいったん終わった次の街といった所で予想よりは遠かった。オルセーは古い大学もある歴史のある街であるが、研究所は街からバスで 10 分ゆられた畑の中にある。季節が良ければおそらくは牧農的でのどかな風景であろうが、今年はちょうど極寒の冬でもあったこともあり研究所のまわりは一面凍てつく荒野であった。季節は残念でも昼の食堂は毎日の楽しみであった。国によっては悲惨な食事も多いが、CEA サクレーの昼食には感謝の気持ちで一杯である。夕食会の代わりに昼食会を所内で開催してくれたが、そこでの食事は今でもその余韻が舌に残っているくらいである。



図 2 集合写真 (2010 年 2 月 11 日、CEA サクレー研究所にて)

## 3. ベンチマーク内容

ベンチマーク対象は、核子入射でターゲットは C ~ U、エネルギー  $20 \text{ MeV} < E < 3 \text{ GeV}$  の反応と定義されている。今回は以下の実験値が採択された。

- ・陽子・中性子入射による、2 次中性子生成二重微分断面積 13 反応 99 スペクトル
- ・陽子入射による、中性子多重度 8 反応
- ・陽子・中性子入射による、陽子・重陽子・He 等軽粒子生成二重微分断面積

## 14 反応 353 スペクトル

- ・陽子入射による、パイオン生成二重微分断面積 5 反応 92 スペクトル
- ・陽子入射による、核破砕生成質量分布あるいは Z 分布 5 件
- ・陽子入射による、核破砕生成物の入射エネルギー依存（励起関数）2 件

これらの実験値に対して PHITS は JQMD + GEM、JAM + GEM、Bertini + GEM の 3 つの異なるモデルで計算を行った。この膨大な数の計算はすべて原子力機構・放射線工学の松田氏によるものである。

ベンチマーク対象のモデルは以下の通りである。

CEM03-02, CEM03-03, CASCADE-04, PHITS-JAM, PHITS-Bertini, PHITS-JQMD, ISABEL+SMM, ISABEL+Gemini++, GEANT4-Bertini, GEANT4-Binary, CASCADE-asf, INCL4.5+Abla07, INCL4.5+SMM, ISABEL+ABLE07, INCL4.5+Gemini++, CASCADEX, MCNPX-Bertini

詳細は以下を参照されたい。すべての実験値と計算値の数値と図がダウンロード可能である。

<http://nds121.iaea.org/alberto/mediawiki-1.6.10/index.php/Benchmark:2ndWorkProg>



図 3 オルセーの駅前

#### 4. 核内カスケードとコアレッセンス模型

本ベンチマークで主に検証された核内カスケード模型について最近の流行も含めて簡単に紹介したい。核内カスケードは核子と原子核の衝突を、核子と核子の二体衝突のみで扱う模型である。入射核子は原子核内のある一つの核子としか衝突しない。衝突の際、核内の他の核子はこの核子-核子の衝突自体には干渉しない。常に1対1で、2対2や1対3などは無いのである。核内カスケードの「輸送」と「衝突」の扱いは汎用モンテカルロコードのそれと根本的に同じで、マクロとミクロをうまく切り分けて扱う。入射粒子が衝突を起こすまでの距離を全断面積すなわち平均自由行程から計算し、その距離まで直進させた後に衝突計算を行うのである。直進する間は何も起きないという基本でよい。核内カスケードにおける相互作用は、中性子-中性子もしくは陽子-中性子のこの二つのみであるので、 $nn$ の断面積と $np$ の断面積だけ用意すればコードが書ける算段である。

核内カスケード模型における最近の流行は、コアレッセンス（訳は、合体、癒着、同伴など）模型の導入による軽粒子放出チャンネルの再現にある。核内カスケード模型はたとえ $n+^{12}\text{C}$ の反応でも $n+n$ か $n+p$ の二体衝突しか計算しないので、たとえ核子の非弾性散乱を入れたとしても $n+n$ のあとにトリチウムや $\alpha$ 粒子は作られない。すなわち中性子や陽子による $\alpha$ 粒子のはじき出しは核内カスケードでは計算されない。実際にはその後蒸発模型が呼び出されることによって $\alpha$ 粒子は放出されるのだが、その運動エネルギーは低い。一方で核子入射反応による高エネルギー軽粒子の放出がこれまで観測されていて、核内カスケード模型はこれを再現できないでいた。これを核内カスケード模型体系の中で再現するための手法がコアレッセンス模型である。

コアレッセンス模型の概略は、核子が原子核外へ飛び出す際に周りにいる数個の核子を引き連れることにより軽粒子として飛び出てくるというものである。高い運動エネルギーで核外へ出ようとしている核子が軽粒子に化けるために、高エネルギーの軽粒子が生成されるという仕組みである。そんな事をすることによって核子が出る量が従来から減ってしまうのではとも思ったりもするが、100個のうち1個起こる程度でも高エネルギー軽粒子の生成としては十分なようである。いずれにせよ、コアレッセンス模型の導入によって軽粒子放出の問題が解消され、核内カスケード計算体系は完成に至ったと思えるくらいの結果を本会合で目の当たりにした。

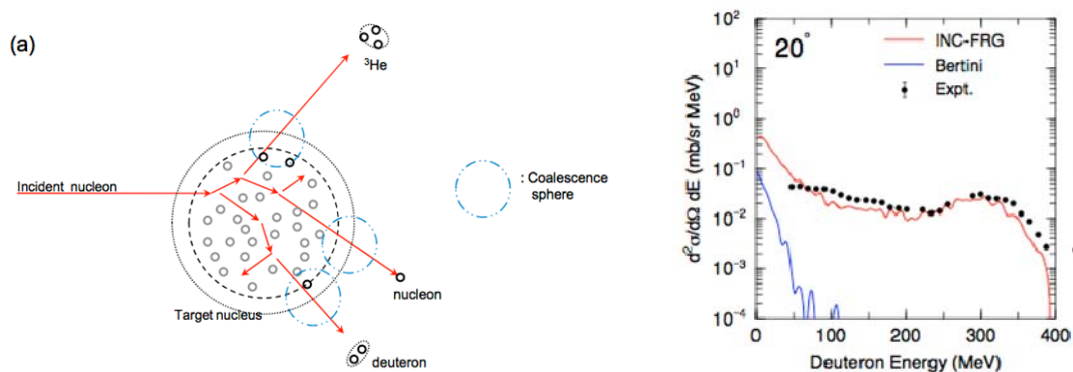


図4 表面コアレスセンス模型概念図とその計算例（九州大博士論文 岩元大樹氏）。  
392 MeV 陽子による重陽子生成。右図において青線が従来の核内カスケードの結果、コアレスセンスを入れることで赤線のようになる。

## 5. ベンチマーク結果

本会合で核子放出や核破碎分布などいろいろなベンチマークを行ったが、その結果を以下に手短にまとめる。中性子や陽子生成はどの模型も再現性が良かった。この分野は PHITS の JQMD や JAM の結果が一番かと思っていたのだがそれ以上に優秀な模型が多い事に驚いた。中性子の多重度、すなわち 1 回の反応あたりの中性子生成数分布はどの模型も実験値を過小評価した。もう少し詳しく述べると 1.2 GeV 陽子+鉛の反応における中性子の生成数は 1 反応当たり 0 個から 37 個くらいまで分布してそのうち 16~17 個生成にピークをもつが、多くの計算値は 11~12 個にピークを持っていた。ここの再現は個人的に重要ではないかと感じた。軽粒子生成は、低エネルギー成分は蒸発模型からでるのでどの模型もそれなりに良く、高エネルギー成分はコアレスセンスが入った模型のみが再現するという結果だった。この部分の PHITS は全敗であるが、その断面積は核子生成に比べて 1 桁から 2 桁小さいという事は考慮したい。核破碎分布は 5、6 桁に渡る広い桁をログ表示 1 枚に表示するのでどの模型も良く一致している様に見える。核破碎分布の再現には直接過程と蒸発過程の両方に精度が必要で、例えば JQMD + GEM、JAM + GEM、Bertini + GEM と蒸発模型を固定して三つ計算するとそれぞれ違う結果が得られることがあるが、印象としては、GEM は正しいとしてその前段階を議論する方向で良いと感じた。他のコードにも GEM は使われていて良い結果を出しているし、Abla07 など他の蒸発モデルからも良い結果が得られていた。本ベンチマーク全般を PHITS に限って言えば JAM+GEM の組み合わせが一番良かった。Bertini が予想以上に善戦していた。PHITS 3 模型と他発表者の模型を比べると総じて他の模型の方が良く、PHITS は（核子入射でこのエネルギー領域の反応に対しては）遅れをとっているという印象を持った。その理由としてはコアレスセンスの効果もあるのだが、何よりも実験値を再現するのだと

いう心意気の差が数値にも現れてきているようにも感じた。本会合では実に多くのグラフを見てきたが、だんだん慣れて（麻痺して）くると実験値と計算値を、両対数で表示したグラフで上の方と下の方と、どこも関係無くその離れ具合だけを評価してしまうようになってしまい危険である。下の方にあるレアイベントをモデルで再現する事は楽しい事だがそればかりに目が行ってしまつては総合的な判断に支障をきたす。またエネルギースペクトルは低エネルギー部にいくほど盛り上がって表示されている事にも注意が必要である。今後はこれらの様々な反応を、断面積の高い重要なチャンネルに重みを置きながら総合的に評価することが重要であると思われる。これを実感的に調べるためにも積分型の実験をベンチマークに取り入れる事は一つ必要ではないだろうか。Cugnon 氏には賛同をいただいた。最後に今後の実験についての議論もあった。個々のチャンネルの測定以外に、関連した複数の量の同時測定 (correlation) をしたいという意見があった。またそういった実験をするにあたっての日本への期待が大きかった。主要メンバーの高齢化も進んでいて腰が重そうであった。



図5 会議期間中のCEA サクレ研究所

## 6 結言

核子入射による破砕反応ベンチマークに参加して、彼らがいかに核内カスケードにこだわり育ててきたかを認識した。これまで再現できずにいた高エネルギー軽粒子の生成

は、表面コアレスセンスという解釈で解決された。本会合はまるでその完成お披露目会のように、コアレスセンスの絶大なる効能を、まるで解法をすでに知っているパズルを繰り返し解いてみせられているようであった。コアレスセンス模型によって、核内カスケード計算体系は見事に完成にいたったと実感した。このことは逆に原子核反応が核子の 2 体衝突という単純な運動学だけでは解けない事を意味し、実際に会場の多くが今回の成功を喜ぶとともに、QMD への羨望—より物理的な解釈による解法を強く望んでいる事も分かった。QMD は全平衡やコアレスセンスの様な現象を潜在的に再現できるので、そういう事を QMD でやってみたいということである。一方で今回のベンチマークでは高エネルギー軽粒子生成の再現性が一つの焦点であったため、コアレスセンスで良く調整された他模型とは対照的に JQMD の苦手部分が目立ってしまった。QMD にコアレスセンスを入れる試みもなされているし、個人的にはクラスターを入れたものも見てみたい。今後の QMD の動きは内外に注目されると思われる。本会合で得た知見は多く、今後の PHITS の発展に少しでも貢献できるよう努力を決意する次第である。

最後に、発表の機会を与えて下さった RIST の仁井田さん、私の出張費を持ってくれた Sylvie と CEA サクレー研究所にお礼を申し上げるとともに、あの膨大な量の計算をされたにもかかわらず実験のため発表ができなかった原子力機構の松田さん、お疲れさまでした。



図 6 会場風景

**Monday, 8 February 2010**

10:00 - 12:05

**Mank, G. (IAEA)** - Welcome

**Leray, S. (CEA - France)** - Workshop Objectives; [slides](#)

**Khandaker, M. U. (IAEA)** - Result production and Web site tools; [slides](#)

**Michel, R. (ZSR - Germany)** - Result global analysis: Residues; [slides](#)

14:00 - 15:40

**David, J. -C. (CEA - France)** - Result global analysis: Neutrons; [slides](#)

**Gallmeier, F. (ORNL - USA)** - Result global analysis: Light charged particles; [slides](#)

16:10 - 17:30

**Boudard, A. (CEA - France, Convener)** - Discussion on the global analysis; [slides](#)

**Tuesday, 9 February 2010**

9:00 – 10:40

**Mashnik, S. (LANL - USA)** - CEM0302 results [slides](#)

**Gudima, K. (Academy of Science - Moldova)** - CEM0303 results [slides](#)

11:10 – 12:50

**Kumawat, H. (BARC - India)** - CASCADE4 results [slides](#)

**Korovin, Yu. (INPE - Russia)** - CASCADEX results [slides](#)

14:15 – 15:30

**Yariv, Y. (SOREQ - Israel, Convener)** - Discussion: models based on the Dubna cascade

16:00 – 17:50

**Yariv, Y. (SOREQ - Israel)** - Isabel results [slides](#)

**Cugnon, J. (Univ. Liege - Belgium)** - INCL4 results [slides](#)



## Wednesday, 10 February 2010

9:00 – 10:40

**Ricciardi, M. V. (GSI - Germany)** - Results with ABLA de-excitation code [slides](#)

**Charity, R. (Univ. Saint Louis - USA)** - Results with GEMINI++ de-excitation code [slides](#)

11:10 – 12:40

**Mancusi, D. (Univ. Liege - Belgium)** - Results with SMM de-excitation code [slides](#)

**Cugnon, J. (Univ Liege - Belgium, Convener)** - Discussion: De-excitation models

14:30 – 16:00

**Quesada-Molina, J. M. (Univ. Sevilla - Spain)** - GEANT4 results with Bertini, BIC [slides](#)

**Gallmeier, F. (ORNL - USA)** - MCNPX Bertini-Dresner results [slides](#)

16:30 – 18:00

**Iwase, H. (KEK - Japan)** - PHITS Results with Bertini, JAM, JQMD [slides](#)

**Mashnik, S. (LANL - USA, Convener)** - Discussion: Differences in Bertini models [slides](#)

## Thursday, 11 February 2010

9:00 – 11:00

**Titarenko, Yu. (ITEP - Russia)** - Benchmarking the codes against residual nuclide spallation data obtained recently [slides](#)

**Leray, S. (CEA - France, Convener)** - Discussion: Physics conclusions [slides](#)

11:30 – 12:30

**Otsuka, N. (IAEA)** - Contribution of IAEA-NDS and NRDC [slides](#)

**Mank, G. (IAEA, Convener)** - Benchmark conclusions

**Mank, G. (IAEA)** - Closing of the Workshop