

話 題(IV)

前平衡過程に関する国際シンポジウム

1995年10月23日～27日, Smolenice Castle, Slovakia

日本原子力研究所核データセンター

深堀 智生

e-mail: fukahori@cracker.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

標記会合が1995年10月23日～27日、スロバキアのSmolenice城に於いてスロバキア科学アカデミーの主催で開催された。会議では前平衡過程に関する基礎モデル、(p,p')データ解析/カオス、FKK及び他のモデル、特別講演/核データ、複合粒子及び γ 線、重イオン反応/単位密度、光学模型の7つのセッションについての研究発表が行われた。報文集はあらかじめ選択された19の論文(どうもモデルに関するものだけ選択されたい)についてのみスロバキア物理学会誌の特別編集版で出版された(Proc. Int. Symposium on Pre-equilibrium Reactions, Smolenice, Oct. 23-27, 1995, *acta physica slovacica*, 45(6) 617-768 (1995))。

本報告では、発表順番に従ってそれぞれの報告のアウトラインをレビューし、その他の印象についても報告する。各セッションで発表タイトルが元々のプログラムから、しばしば変更されたので、以下では発表のタイトル及び発表者も記し、プログラムは載せないことにする。但し、すべてを解説することは筆者の能力を遥かに超えているので、説明に濃淡があることはお許し頂きたい。

2. 基礎モデル

ここは、前平衡過程における概略を主としてレビューしたセッションであったので、モデルの現状及び問題点が浮き彫りにされ、アウトラインを掴むのに大変参考になった。

2.1 The FKK Theory: Problems and Prospects (Hodgson)

多段階直接 (Multistep Direct, MSD) 及び多段階複合核 (Multistep Compound, MSC) 反応に関して Feshbach-Kerman-Koonin (FKK) モデルを基礎として、最近のモデルの改良、問題点、今後の展望について概説した。最近のモデルの改良に関しては、Chadwick-Young モデルや Marcinkowski モデルにおける $P \Leftrightarrow Q$ 間の状態遷移、MSD

及び集団運動状態 (Collective Reaction: CR) を調べるための Subtraction 法 (複合核過程 (CN) と MSD は 90° 対称の角度分布であることを利用し 90° で折り返した角度 (例: 20° に対する 160°) のスペクトルを差し引くと、MSD と直接過程 (Direct or Collective) 成分だけが残る)、クラスター粒子放出に関して pick-up の立場の岩本-原田モデルと knock-out の立場をとる Olaniyi-Demetriou モデルの比較、CR の計算を直接過程として計算するか、MSD に含めるかの問題、その他 (isospin effect, multiparticle emission) について報告した。

問題点として挙げられたのは、1) 実験データは時として簡単に取ることができるので、多くのモデルによる様々な fit が可能になる。MSD 及び CR を分離して、広い範囲を同じ parameter で合わせる必要がある。2) 有効相互作用強度 V_0 のエネルギー依存性、3) 単一粒子準位密度、4) 全反応断面積 (σ_R) を合わすことのできる光学ポテンシャルパラメータの選定、であった。

今後の課題として、有効相互作用の改善、multiparticle emission、クラスター粒子放出、クラスター粒子入射反応などが挙げられた。

2.2 Pre-equilibrium Reaction Theories: Statistical Assumption (Yoshida)

DWBA を発展させた Tamura-Udagawa-Lenske (TUL) モデル、Random Matrix を用いた Nishioka-Widenmuller-Yoshida (NWy) モデル、Leading Particle Statistics (FKK) 及び Residual System Statistics (TUL, NWy) を併用した Koning-Akkerman モデルの比較概説を行った。統計学的仮定に関して、状態密度は等間隔とするエキシトンモデル (MSC) に対して、MSD では状態密度を等間隔 (Oblozinsky)、陽子-中性子を区別、残留核との相互作用 (Random Matrix) などのアプローチが試みられている。残留核の統計では、1st step MSD または 2 step MSD (sudden approximation, adiabatic approximation) が考えられている。P \leftrightarrow Q 状態遷移では、通常の imaginary potential を P 及び Q 状態に分ける試みについて概説された。

2.3 Global Test of Quantum Mechanical Pre-equilibrium Models (Koning)

前平衡過程研究の歴史、MSC、MSD code のレビュー及び MSD モデルの相違点を述べた後、MINGUS (Koning のコード) の解説を行った。FKK、TUL、NWy 等の分岐 (Ref. B. Bonetti et al., Physics Report, 247 (1994)) 及び比較から TUL の方がよりよい結果を与えるようであるが、核データ再現のためには FKK で十分であろうというのが彼の結論らしい。

MINGUS システムは MINGUS1、ECIS95、MINGUS2、MINGUS3 から成り、離散準位の非弾性散乱を考慮している。MSD 部分 (離散準位の非弾性散乱をあらかじめ差し引いておく) では、FKK \rightarrow Legendre 係数への変換を試験中で、非弾性散乱様の反応 ((p,n), (n,n'), (n',n'')) を用いて multiparticle emission を考慮している。MSC 部分で

は、FKK 及び constant temperature + Ignatyuk の準位密度公式を用いているようだ。FKK の有効相互作用強度に関して、 $V_0^2 = 84.2e^{-E/84.2}$ の関係を導いている。今後の課題として、1) 有効相互作用に関して、Lindsay 及び Watanabe のアプローチを検討する、2) 変形 Nilsson モデルを用いた完全な microscopic MSD の記述、3) Chadwick 方式での非束縛 p-h 状態を記述、4) クラスタ粒子放出 (knock-out のアプローチ)、5) 多粒子放出、6) 陽子と中性子を分離した 2 component MSD の開発などを挙げていた。

2.4 Multistep Description of Pre-equilibrium and Dissipative Reactions (Wolter)

TUL 理論の枠内での統計的 MSD 理論の概要、重イオン反応における相互励起、平均核構造計算、MSC、軽イオン入射反応への応用などの話があったが、内容が盛りだくさんだったので時間が十分でなかったようだ。

3. (p,p') データ解析/カオス

3.1 Semiclassical Distorted Wave Model for Multistep Direct Process in (p,p'x) and (p,nx) Reaction (Kawai)

Semiclassical Distorted Wave (SCDW) モデルの概要について報告された。1、2 ステップ放出の数値計算の定式化に関して、MSD 遷移振幅の Born 級数展開、連続状態への遷移断面積、Local Semiclassical Approximation に関する記述の報告があった。グローバルな核子-原子核光学ポテンシャル、自由空間または核物質内での核子-核子断面積、核子の密度分布、ポテンシャルの非局所補正などを用いた計算結果では、1st ステップが疑似弾性散乱的な振る舞いをするため前方に放出が片寄るので後方角での結果が過小評価となると報告された。

3.2 Application of the FKK Model to (p,p') Reaction at Low Incident Energy (Watanabe)

CN 及び MSC に isospin 効果を導入した FKK を低入射エネルギーの (p,p') 計算に応用した。(n,n') と (p,p') で有効相互作用強度 V_0 の系統性が違うとの報告があった。

3.3 Quantum Chaos, Correspondence Principle, Independence Hypothesis and Modern Theories of Preequilibrium Timedelayed Nuclear and Heavyion Reactions (Kun)

カオス理論を軸に、Feshbach S 行列から、多段階統計散乱、さらに FKK、MSC を導出した。しかし、筆者にこの解説は荷が重すぎる。

3.4 Spin in Preequilibrium Master Equation (Betak)

Chadwick-Oblozinsky のスピン依存前平衡遷移確率を拡張し、彼の PEGAS (前平衡 γ 放出 + スピン依存) コードに組み込んだ。マスター方程式、multiparticle emission、 γ 核子の競合、離散準位及び isomer 準位を考慮した PEGAS-D (PEGAS + CR) の概説を行った。

4. FKK 及び他のモデル

4.1 New FKK Multistep Reaction Calculations (Demetriou)

前平衡過程における CR の考え方、有効相互作用の A 依存、collective 準位への断面積、巨大共鳴の系統性などの FKK に対する影響に関する報告があった。

4.2 Interplay of Surface Effects and Gradual Absorption in Multistep Reaction

Calculation (Avriganu)

平均自由行程 (MFP) からの有効相互作用強度 V_0 決定法の報告があった。

4.3 On Gradual Absorption and the Variety of Pre-equilibrium Reaction (Marcinkowski)

「今までは小さいと無視してきた直接弾性外散乱断面積は弾性外散乱断面積の 40% にもなる」との話を色々な角度から説明した。また、動かすべきでないパラメータとして、 $V_0 = 28 \text{ MeV}$ (Austin'83)、 $(\sigma_{\text{outgoing}})^2 = 0.28 \times 2 \times A^{2/3}$ (Fu'86)、 $g = A/13$ (Ericson'60) を挙げていた。 V_0 に関して、この値では実験値を過小評価するが、ここには他の物理 (例えば、直接非弾性散乱) があるはずだとの見解を示した。結論はまだ出ていない。

4.4 Multiple Pre-equilibrium Emission and the Interpretation of Experimental Results

(Cowley)

(p,p') の inclusive な測定から、MSD の定式化、 V_0 のエネルギー依存性を導出した。また、完全な knock-out 反応は全体の 10% 以下であるという報告もあった。

4.5 Refinement to MSD Calculation (Richter)

80 ~ 200 MeV での (p,p') の実験 (結果は ftp で取得可らしい) と FKK 計算の比較を行い、角度分布は良く合っており、多粒子放出を考慮すれば絶対値も合うだろうという結論を述べている。また、有効相互作用強度に関して、入射エネルギーに依存しない V_0 では多粒子放出の補正が必要であり、入射エネルギー依存の V_0 に関しては exponential または linear の fitting では linear の方がよいであろうと述べていた。

4.6 The Use of a Realistic Nuclear Nucleon Interaction (Lindsay)

FKK を軸とし、有効相互作用を中心部分のみを考慮した 2 component で表す方式について報告があった。利点として、spin-orbit 及び tensor 部分が含まれる、2 component 理論による陽子と中性子の区別、DW81 を使って電荷交換の効果を計算可能などが挙げられた。また、1 fm Yukawa ポテンシャルの代わりに M3Y ポテンシャルを使った計算の報告もあった。

4.7 Consistent Exciton Model Calculation with Shell Structure, Pairing and Isospin

Effects (Kalbach Walker)

MSD・MSCの議論の中、唯一のエキシトンモデルの話であったが、権威者の話を聞くとまだまだ有効であるように思われた。軽入射粒子反応の一般化されたエキシトンモデルのためには、 $p-h$ 状態密度に敏感な、pairing・shell構造、isospin保存、直接過程への表面効果、さらに、陽子及び中性子を区別する必要があるとの報告があった。推奨パラメータとして、 $g_0(\pi)=Z/15$ 、 $g_0(v)=N/15$ 、 $M^2_{p,n}=K_{p,n}A^{-3}(20.9+E/n)^{-3}$ [$K_{p,n}=3 \times 10^5$ 、 $K_{pp}=5 \times 10^5$ 、 n :自由度 (=3としても良い?)]、shell gap (質量表より)、pairing energy (平滑化したGilbert-Cameron)、isospin symmetry energy (質量公式の体積及び表面对称項)などが挙げられていた。また、エキシトンモデルにおいても多粒子放出は行列要素に原理的に含むことができるとの報告があった。問題点として、 M^2 のエネルギー依存性が挙げられていた。

5. 特別講演及び核データ

5.1 Sharp (e^+e^-) Pairs: a Puzzle into a Mystery (Griffin)

Sharp (e^+e^-) Pairs についての概要、 β^+ atom (positronium) 及び Q_0 粒子 ($e^+e^+e^-e^-$) に関する話題であった。筆者は完全に置いて行かれてしまった感じであった。

5.2 Pre-equilibrium and Statistical Model in Radiation Therapy (Chadwick)

光核反応を含む LLNL の放射線治療計算のための核データ評価及びエキシトンモデル + Kalbach 系統性の拡張によるしてスピン依存性導入について報告があった。

5.3 Use of Preequilibrium Model in Nuclear Data Evaluation (Oblozinsky)

中間エネルギー領域に関する IAEA/CRP (医療用放射性同位体、光核反応データ) 及びその他の CRP (放射化断面積、標準入力パラメータライブラリー) についての概説があった。

5.4 Recent JAERI Activities in Nuclear Model Field (Fukahori)

岩本-原田複合粒子放出モデルの ALICE-F への導入、核内カスケードモデル + 前平衡過程 (HETC/3 STEP)、量子論的分子動力学法 (QMD) に関して、特に FKK 計算との比較について報告した。

5.5 Recent Analysis with GNASH (Young)

米国 (特に LANL) での加速器駆動技術開発 (ADTP)、FKK の核データ評価への応用、Kalbach cluster model について報告があった。

6. 複合粒子 / γ 線

6.1 Pre-equilibrium Emission of Clusters in Nuclear Reactions (Shubin)

クラスター粒子放出モデルに関するレビューで、coalescence model (Ribansky &

Oblozinsky)は100 MeV以上で、pick-upモデル(岩本-原田)は70 MeV以下で実験値を再現できるが不十分であるとの報告を行った。Shubinモデル(pick-up + knock-out + evap.)では、pick-upには改良型岩本-原田モデル($\Sigma F_{i,n}=0.3$)を、knock-outにはRibansky-Oblozinskyモデル($\phi(\alpha)=0.012$: α 粒子の preformation factor)を、また $g=A/13$ を用いて計算を行う。但し、3つの粒子を pick-up するときは t の preformation factor を利用する様な pick-up にも preformation factor が入っているなどの問題点が指摘されていた。

6.2 Direct and Statistical Neutron Emission from Transfer Reaction (Beumel)

微視的な連続状態の構造 (high-lying 単一粒子状態) を直接過程として記述することにより核構造の描象を前平衡過程に導入した。SCDW との違いは collective level とするか単一粒子準位とするかの差であろうか。

6.3 Analysis of Neutron Spectra in (α,n) Reactions (Zhuravlev)

α 粒子 ($E=45$ MeV) を用いた ^{27}Al 、 $^{52,53}\text{Cr}$ 、 ^{56}Fe 、 $^{58,60,62}\text{Ni}$ 、 $^{90,91,94}\text{Zr}$ 、 ^{113}Cd 、 ^{115}In 、 ^{122}Sn 、 ^{181}Ta に対する TOF 実験の報告があった。

6.4 (n,α) Reactions (Garuska)

(n,α) 反応断面積に関して、同 Z の中で A の増加とともに減少し、粒子ができる確率は陽子に入射対する値 ($(1\sim 5)\times 10^3$) と比較して中性子のそれ ($(10\sim 100)\times 10^3$) は格段に大きいと指摘した。12~18 MeV で20%位の直接過程の寄与があるがそうだ。

6.5 Mass Dependence of Imaginary Part of the Effective Form in the Direct-Semidirect Model (Likar)

Direct-Semidirect モデルによる (n,γ)、(p,γ) 反応の記述についての報告があった。

6.6 Pre-equilibrium Decay in the Exciton Model for Nuclear Potential with a Finite Depth (Sholomo)

単一粒子状態密度に関して色々な式から推定すると $g=A/K$ とすると $K=8\sim 24$ となってしまう、これらは全て Fermigas (free gas) モデルで無限近似で良くないので、有限深さの近似のため phase-shift を導入した。結果として、有限近似の場合 $a=A/K$ で $K=7.5\sim 8.5$ (A が小さいとき K は大きくなる) を得たとの報告があった。

6.7 Angular Momentum Dependence of Transition Rate in the Exciton Model (Sanjour)

マスター方程式の遷移確率 λ に運動量依存性 ($\lambda=\lambda(J)$) を導入することにより isomer 準位の再現が可能になったとの報告があった。

7. 重イオン／準位密度

7.1 Fission Coincident Pre-equilibrium Neutron Emission from Heavyion Reactions

(Scobel)

$^{10}\text{F} + ^{209}\text{Bi}$ 、 $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ 、 $^{64}\text{Ni} + ^{165}\text{Ho}$ の実験の Moving Source Model による解析を報告したが、これだけでは核分裂中性子放出数を再現できない。反応モデルには更に原子核-原子核散乱の動力学及びマスター方程式に時間依存統計カスケード計算を導入することが必要であろうという結論であった。

7.2 Light Particle Emission in ^{16}O Induced Reactions on Al and Ag Target (Kuznetson)

反応の空間-時間発展を記述している。実験において、Al、Ag、(^{16}O (40 MeV)、 x)、 $x=n$ 、 p 、 d 、 α 反応では、それぞれのスペクトルの最高エネルギーは入射エネルギーよりも高い。

7.3 The Study of Pre-equilibrium Decay in the Complete Fusion of

^{20}Ne (8.6-15.0 MeV/u) + ^{208}Pb (Veselsky)

GSI での ^{20}Ne (8.6, 11.4, 14.9 MeV/u) ビームに対する Velocity Separator (SHIP) 用いた測定で 216 、 ^{220}Th 、 ^{213}Ra 、 ^{215}Ac 、 208 、 ^{209}Fr を検出した。この速度分布をモンテカルロ計算と比較し、質量・電荷分布を統計計算及び非平衡+統計計算と比較した。

7.4 Study of Fluctuation in Dissipative Binary Heavy Collision Excitation Function

(Papa)

$^{28}\text{Si} + ^{48}\text{Ti}$ (7.5 MeV/u) の実験解析を輸送理論を導入 (Physics Letters, B258 (1993) 273) して行った。

7.5 Exact Calculation of Nuclear Level Densities and their Angular Momentum and

Parity Dependence up to 500 MeV (Hilaire)

既存の準位密度公式の信頼性を概観し、shell 効果及び個別粒子モデル (Independent Particle Model, IPM) により 4 励起子 (p, h, p, n, h, n) の準位構造などについて報告した。

7.6 Particle Hole Density with Non-equilibrium Singleparticle State (Harangozo)

単一粒子準位密度 $\omega(p, h, U)$ の種々の依存性について報告し、それぞれの極限が Oblozinsky や Williams の公式と一致することを示した。

8. 光学模型

8.1 Fragmentation of Nucleus Quasiparticles and Structure of the Nucleon and

Compound Particle Optical Potentials (Kadmensky)

各種粒子の spectroscopic factor を求め、原子核内の多くの疑似粒子準位及びクラスター粒子の形成確率の計算を行った。また、エネルギー依存の質量及び shell モデルポテ

ンシャルについて、非線形の核構造スペクトルやクラスター崩壊などについて言及したが、式による説明のみで、結果の比較が全くなかった。

8.2 Cluster Emission from Pre-equilibrium State (Bisplinghoff)

エキシトンモデルでのアプローチでは、preformedの枠組みでクラスター粒子放出の実験を記述できず、pick-upにより説明できることを示した。 $\rho_{p-4, n}(U)$ は簡単に入り、 $\rho_{p-3, n+1}(U)$ を入れると50%実験値を再現できるが、 $\rho_{p-2, n+2}(U)$ 、 $\rho_{p-1, n+3}(U)$ 、 $\rho_{p, n+4}(U)$ まで全部入れてしまうと1桁過大評価となる。計算における $\rho(U)$ の制限を1) 放出粒子は十分なエネルギーを持っていなければならない、2) 構成核子は互いに十分近くにいなければならないとしている。

9. 円卓討論

Hodgsonの司会でいくつかのトピックスについての各プレゼンターの問題提起により議論を行った。最終的な結論を導き出すことはできなかったものの、前平衡過程計算における問題点及び今後の課題がかなり明確になったものと思われる。以下、提起された問題点を列記する。()の人名はプレゼンターである。

1) FKKの基礎 (Kawai)

- FKKの2-step計算の中間状態の波動関数は $\chi^{(+)}$ か $\chi^{(-)}$ か
- 中間状態のon-shell近似の妥当性

2) collective effect (Wolter)

- collective levelの効果を考慮するためには、low-lying levelのみでなくhigh-lying levelも考えに入れなければならない

3) 前平衡過程からの multiparticle emission (Cowley)

- $E_{in} = 200$ MeVでknock-outは約10%
- multiparticle emissionは放出エネルギーが低い部分に有効

4) gradual absorption (Marcinkowski)

- gradual absorptionはMSCとCNに対応する
- 放出エネルギーの低い部分のスペクトルを過大評価する

5) 計算コード (Koning)

- DWBA91 (Rynalのコード)は、あるp-h状態への遷移断面積がDWUCKの $(2J_{n+1})^{1/2}$ 倍
- これらは V_0 と角度分布の推定に影響を与えるので、各自DWUCKとDWBA91をチェックした方が良い
- 有効相互作用に関する他のアプローチ(例M3Y etc.)は開発が待たれる

6) 準位密度 (Hilaire)

- ・非等間隔の単一粒子準位の利用
- ・スピントラップ因子 ($\sigma_{\text{out-off}}$) は重い原子核程重要となる
- ・パリティ分布は低エネルギーでは 1/2 ではなく、振動する
- ・collective effect ($\sigma_{\text{tot}} = k_{\text{rot}} \times k_{\text{vib}} \times \rho$) は本当に必要か

7) 有効相互作用 (Lindsay)

- ・Brady らのアプローチ (Phys. Rev., C43 (1991)) M3Y
- ・変形の影響
- ・2 component アプローチ (Austin, 1974, 1980)
- ・Skyrme アプローチ (QMD)

8) 有効相互作用 V_0 の系統性 (Richer)

- ・ V_0 は $E^{-1/2}$ に依存するか、 E^{-1} に依存するか？ また、 V_0 は質量数に依存するか？

9) 統計反応の Stochastic モデリング (Kun)

- ・アプローチの定式化
- ・スピン-パリティのやぶれへの応用？

10. Summary Talk

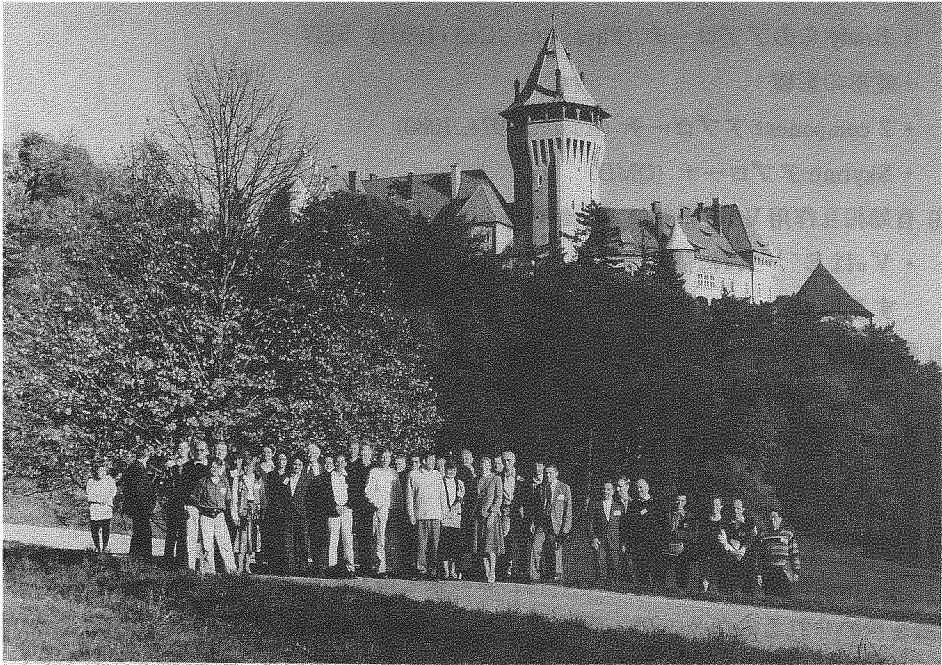
Griffin により last remark が行われた。彼の論を借りれば、「1) どうやって最も良い理論を決められるのか？、2) それぞれのアプローチで何が入力で何が説明できるかのリストを作る必要がある、3) 少数の入力でより多くの物理量が説明できるのが良い理論である」そうだが、なかなか決められないのが現状であろう。

11. おわりに

10月25日(水)午後、Smolenice 城からバスで北へ2時間の所の、ローマ時代から築城・増築されてきた Trencin 城への遠足があった。途中の Nahac の町には稼働中の原子力発電所があり、原子力発電でスロバキアの40%の電力をまかなっているということであった。その後南へ下り、Modra のワイン学校(スロバキアではここを出なければ、ワイン技師の資格がもらえない)を訪れ、白4本、赤1本の試飲会を夕食をかねて行った。1本1本、長々とうんちくを聞かされた後のワインは格別であった(もちろん、何もなくてもおいしかった)。

本シンポジウムでは、様々なアプローチによる前平衡過程の説明が一度に聞くことができたので非常に有益であった。しかし、それぞれにまだ一長一短があり、Griffin

の話にあるようにどれを選択すべきかはまだまだ結論が出そうにもない。今後の発展が望まれる。時にはうんちくが必要なのであろうが、ワインのようにじっくり試飲して、各料理にあったものを選択すべきなのであろう。



シンポジウムの参加者。後ろは会場となった Smolenice 城