

## II 測定研究トピックス

— 米国での状況を中心として —

京大炉 小林 捷 平

1976年9月迄、丁度一か年間レンスラー工科大学 (Rensselaer Polytechnic Institute, 略してR.P.I.) に留学させていただく機会を得ました。R.P.I.には御承知の方も多い様に100MeVの電子線型加速器があり、Dr.R.C.Block (現在 Gaerttner Laboratory の Director) を中心に、中性子断面積の研究が精力的に行われている。私がR.P.I.で主として従事していた研究テーマは $^{238}\text{U}$ の共鳴パラメータに関するSelf Indication ベンチマーク実験\*と $^{45}\text{Sc}$ の中性子全断面積極小値の測定\*\*であります。これらの詳細は別紙<sup>1)~3)</sup>に譲るとして、私が見聞した測定研究の話題について触れてみたいと思います。

私はR.P.I.滞在中にBNL, NBS, ORNL, ANLの他プリンストン大学のPrinceton Reference Design (PRD)を見学させていただく機会を得ました。BNLへは $^{45}\text{Sc}$ 実験の打ち合せの為、Physics DivisionのDr.R.E.Chrienに会いに行ったのですが、丁度その時Cross Section Evaluation Working GroupのMeetingが開かれており、日本でもお会いしたことのあるDr.S.Pearlsteinとも再会できました。また、この時紹介していただいた多くの方々とは、後日NBS, ORNLを訪問した時にいろいろとお世話になりました。

ここに紹介させていただく測定研究トピックスはR.P.I.の状況の他、BNL, NBS, ORNL, ANL (私が訪問した順) 等で進められている核データに関連した研究テーマ<sup>4)</sup>の中から幾つか羅列させていただきます。

### RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE

R.P.I.にはRINS (Rensselaer Intense Neutron Source) と称される1.8メートル立方 (重量約75トン) の鉛スペクトロメータ (Fig. 1) があり、かつてR.P.I. Linac との組合せによって $^{238}\text{U}$ のsubthreshold fissionが発見された<sup>5)</sup>。RINSは通常のTOF法に比べてエネルギー分解能が劣るものの、格段に高い中性子束が得られる利点がある。この様子を比較した例がTable 1である。その後も引き続きsubthresholdエネルギー領域での $^{238}\text{U}$ ,

---

\* Supported by Electric Power Research Institute, U.S.A.

\*\* Supported by Energy Research and Development Administration, U.S.A.

$^{238}\text{U}(n,f)$  MEASUREMENTS BELOW 100 keV

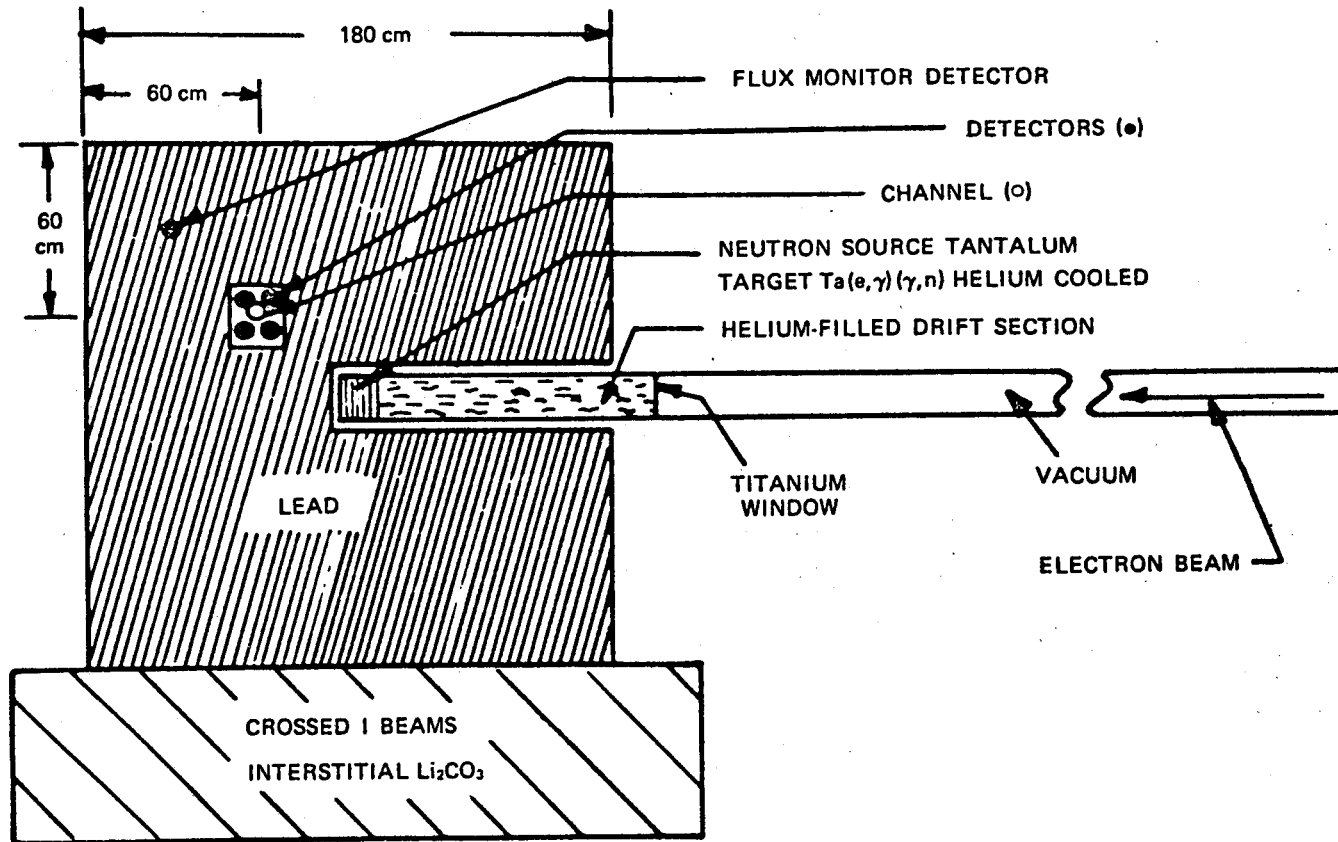


Fig. 1. The RINS lead slowing down spectrometer system.

$^{232}\text{Th}$  に関する研究が進められており、最近100KeV以下での $^{238}\text{U}(n, f)$  反応断面積の測定に関する論文が出た<sup>6)</sup>。RINS中に挿入した $^{238}\text{U}$ の小型核分裂計数管によって得られたパルス波高分布図をFig. 2に、 $^{238}\text{U}(n, f)$  反応断面積の測定結果をFig. 3に示す。最近では subthreshold エネルギー領域における $^{232}\text{Th}$  反応断面積測定が進められており、Fig. 4の様な結果が報告されている<sup>7)</sup>。現在、RPIでは $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$  反応による効果について検討されていると聞く<sup>8)</sup>。また $^{245}\text{Cm}(n, f)$  反応についても近々実験が始まる様で、この為に新しい球殻状の小型核分裂箱が準備されつつある。RINSでは高い中性子束が得られるという特徴を生か

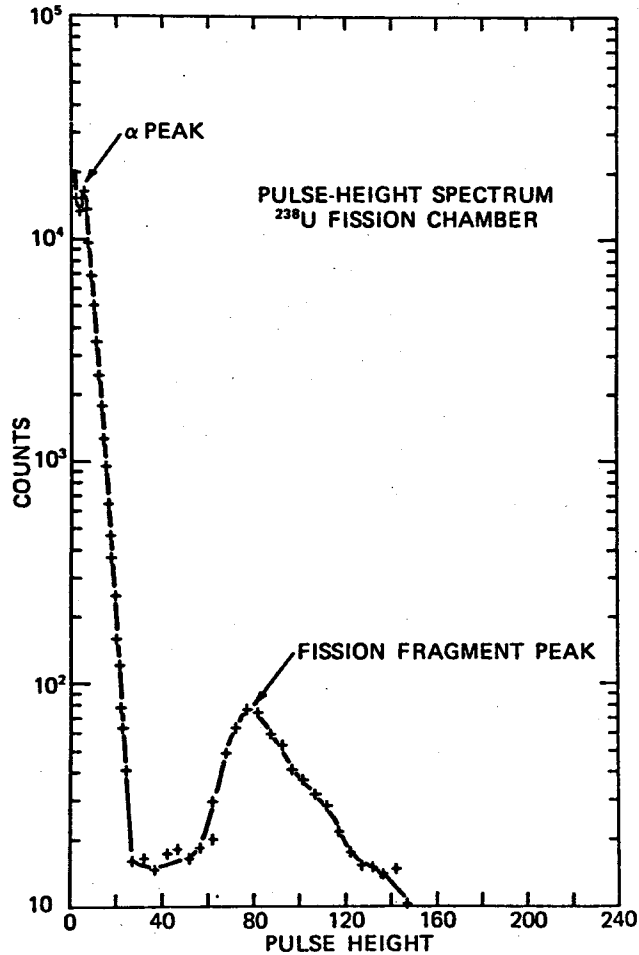


Fig. 2. Pulse-height spectrum for a  $^{238}\text{U}$  fission chamber.

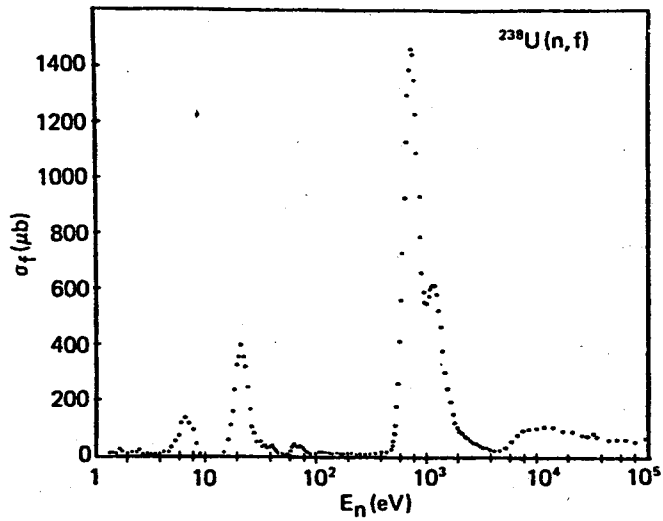


Fig. 3. The  $^{238}\text{U}$  fission cross section from 1.4 to  $10^5$  eV.

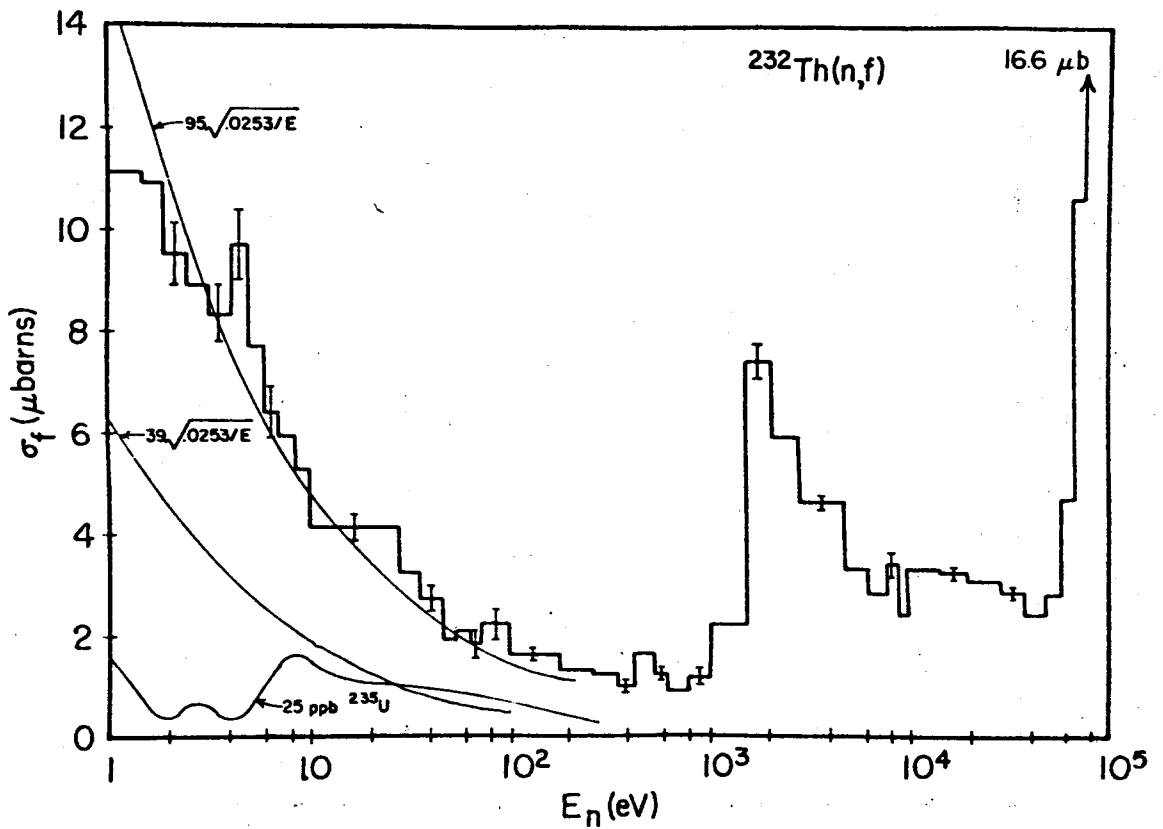


Figure 4  $^{232}\text{Th}$  fission cross section.

して、例えば 1  $\mu\text{g}$  の試料があれば 1 b の反応断面積が測定できるという。RPI では今後も RINS を十分活用することによって Actinide 系核種の中性子断面積のみならず、例えば  $^{147}\text{Sm}$  ( $n, \alpha$ ),  $^{145}\text{Nd}$  ( $n, \alpha$ ) 等の反応断面積測定も考えられている様である。

RPI で進められている研究テーマの一つに、LMFBR に関連した核データ、主として中性子捕獲断面積、全断面積の測定がある。対象とする核種は stable isotopes ( $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{115}\text{Pd}$ , etc.), radioactive isotopes ( $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ , etc.), Tag gas method において注目される Kr isotope 等で、最近では  $^{95,97}\text{Mo}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ , Pd, Pr, Kr に関する実験が進められている。東工大・京大炉グループが鉄フィルタ法で得た  $^{133}\text{Cs}$  の捕獲断面積は Popov の値に近いが、RPI の結果では約 10% 大きくなったと報告されている<sup>9)</sup>。

$^{45}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  の断面積最小値の測定は、より適切な中性子フィルタ法の確立の観点から注目される<sup>3)</sup>。 $^{45}\text{Sc}$  に関しては約 2 KeV 近辺の断面積最小値は従来値より約 1 桁大きく ( $0.71 \pm 0.03$  b),  $^{56}\text{Fe}$  の 24 KeV 近傍の極小値は僅か  $16 \pm 6$  mb であることが分った。また、鉄フィルタ法では単に 24.3 KeV の極小値だけでなく、69.8, 80.3, 131, 166, 180 KeV の極小値もフィルタ法として断面積測定に応用された<sup>10)</sup>。

Dr. Becker グループの核データ評価研究も注目される。積分実験結果と輸送理論解析結果の比較から、ENDF/B データの評価が行われている。現在 RPI では Malaviya や Kaushal 等の実験後、この種の積分実験は行われていないが(極く最近の話では、再び始まることになるかもしれない)、当時のデータを基に組定数の評価及び検討が加えられている。その為に PDP-15 用のハードウェア、ソフトウェアが RPI で開発され、Graphic Analysis System 法が活用されている。現在、鉄及びウランに関する組定数評価が一応完了した段階である。更に、Becker グループでは原子炉の安全解析、臨界計算、燃焼計算等の他、動力炉の燃料サイクル・コストに関する解析等も精力的に進めている。

$^{238}\text{U}$  の Self Indication 実験結果について、最近 BNL と ORNL のグループが論文を出した<sup>11), 12)</sup>。RPI 実験の特徴は彼らの場合と違って試料の温度を 77°K, 293°K, 873°K の三種類についての実験結果から、Doppler Broadening の検証を行い、更に  $^{238}\text{U}$  試料の厚さを変えたベンチマーク実験である。高温実験はむしろ原子炉炉心中での実情に即したものとして極めて有効である。RPI 実験の配置図を Fig. 5 に示す。 $^{238}\text{U}$  の共鳴パラメータとして RPI のグループが求めた結果を Table 2 に示す。この表の意味はベンチマーク実験データを fit させる為には、ENDF/B-N の各パラメータをどれだけ変化させる必要があるかを示したものである。この表には BNL, ORNL グループとの比較結果も示されている。

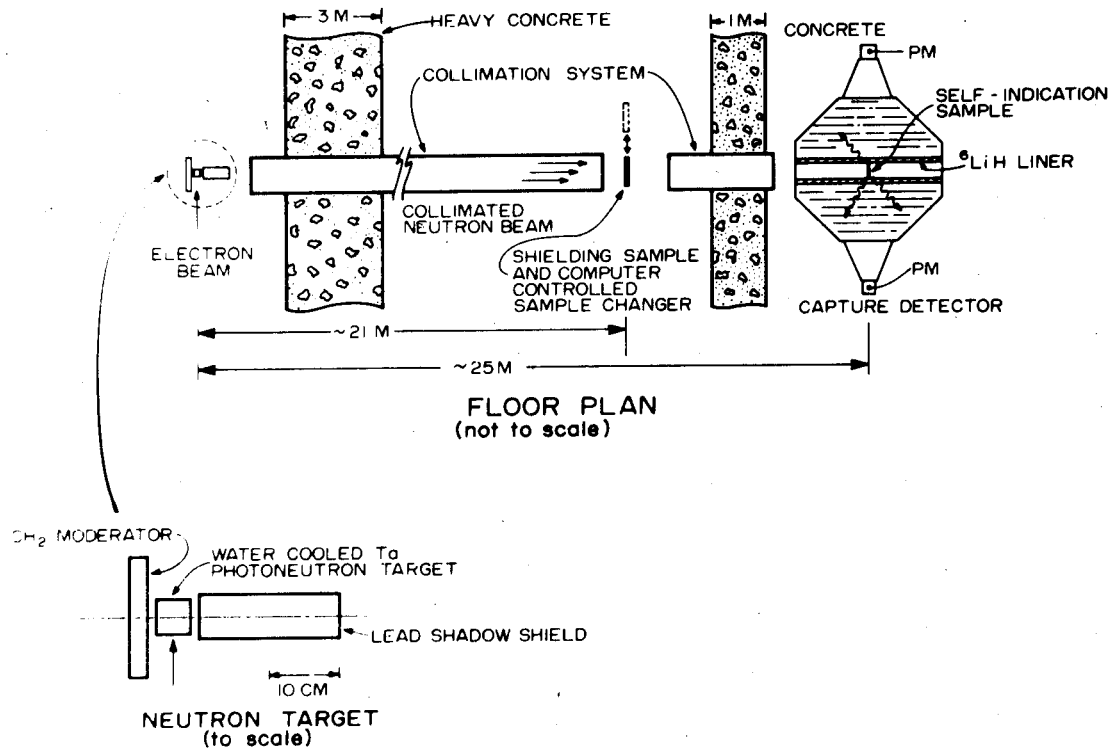


Fig.5 Experimental arrangement of  $^{238}\text{U}$  self-indication measurement

Table 1 Comparison of RINS Flux to TOF Flux  
(at a 5-m Flight Path) for the  
Same Power on Target

$E_n$ (eV)	$\phi_{\text{RINS}}/\phi_{\text{TOF}}$
1000	5 800
100	7 800
10	10 500
1	14 300

Table 2 Comparison of resonance parameters of  $^{238}\text{U}$

Results for 6.67 ev Level

	Percent Change		Chi-squared
	in $\Gamma_\gamma$	in $\Gamma_n$	
RPI ( $\Gamma_\gamma, \Gamma_n$ fit)	-19.4	+4.3	10.6
RPI ( $\Gamma_\gamma$ fit)	-19.1	0	10.65
ORNL	-10.2	-1.3	
BNL	-14.8	0	

Results for 20.9 ev Level

	Percent Change		Chi-squared
	in $\Gamma_\gamma$	in $\Gamma_n$	
RPI ( $\Gamma_\gamma, \Gamma_n$ fit)	-16.5	+5.3	5.7
RPI ( $\Gamma_\gamma$ fit)	-13.9	0.	13.9
ORNL	-14.9	+15.4	
BNL	-12.3	+12.0	

Results for 36.8 ev Level

	Percent Change		Chi-squared
	in $\Gamma_\gamma$	in $\Gamma_n$	
RPI ( $\Gamma_\gamma, \Gamma_n$ fit)	-15.1	-0.8	7.8
RPI ( $\Gamma_\gamma$ fit)	-15.2	0	8.0
ORNL	-11.9	+8.6	
BNL	- 9.2	+6.4	

The Measurement of the  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  Cross Section with an Fe-Filtered Beam.

Neutron Capture and Transmission Measurements on  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{97}\text{Mo}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  and  $^{143}\text{Nd}$ .

Neutron Capture Cross Section Measurements of  $^{99}\text{Tc}$  up to 80 keV.

Neutron Total and Capture Cross Section Measurements on Fission Product Pd.

Capture Cross Section Measurements of Pr and Kr.

$^{238}\text{U}(n,f)$  Measurements Below 100 keV.

$^{232}\text{Th}(n,f)$  Measurements in RINS.

A Fission Chamber for Cross Section Measurements with 1  $\mu\text{g}$  Samples.

Neutron Total Cross Section Measurements of the 2 keV Minimum in  $^{45}\text{Sc}$  and the 24 keV Minimum in  $^{56}\text{Fe}$ .

Temperature-Dependent Self-Indication Measurements in  $^{238}\text{U}$ .

Sensitivity Analysis for Shielding Data Evaluation by Interactive Graphics Computing.

Assessment and Evaluation of Sodium Cross Sections on the Basis of Integral Flux Measurements.

An Assessment of ENDF/B-IV for Iron Based on Integral Measurements.

Fuel Cycle Sensitivity Analysis System for Light Water Reactors.

Analysis of Sensitivity of PWR Fuel Cycle Costs to Uncertainties in Nuclear Data.

Two-Phase Flow Phenomena in Nuclear Reactors.



## BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

BNLでは核データ測定グループの一つとしてDr. R. E. Chrien のグループを挙げることができる。彼らのHFBR (最近40 MWから60 MWに出力上昇されたはず) を用いたビーム実験は、Sc (2KeV), Fe (24KeV) 等の中性子フィルタ法とFast Chopper TOF法が主である。最近、RPIグループと共同して $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  の断面積極小値の測定と解析を行った<sup>3)</sup>。断面積パラメータを求めるに当ってS-wave とP-wave 効果の評価上、2KeV と24KeV 中性子フィルタビーム実験は興味ある方法である。その他、即発ガンマ線スペクトル測定の結果から、スピン、パリティのAssignments を行う仕事も注目される。最近、BNLグループにおいても $^{238}\text{U}$  の共鳴パラメータに関するベンチマーク実験と解析に関連した研究がある<sup>11)</sup>。

Epithermal Neutron Capture in Uranium-238.

Level Structure of  $^{233}\text{Th}$  from the  $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$  Reaction Using  
2- and 24-keV Neutrons.

The  $^{125}\text{Te}(n,\gamma)$  Reaction at 2- and 24- keV.

The Excitation of Particle-Hole States in  $^{88}\text{Sr}$  by the  $(n,\gamma)$   
Reaction.

Gamma Ray Spectroscopy from  $^{240}\text{Pu}(n,\gamma)^{241}\text{Pu}$  at Resonance  
and 24-keV Neutron Energies.

Gamma Ray Spectroscopy from  $^{164}\text{Er}(n,\gamma)$  at Resonance and  
keV Neutron Energies.

Primary Transitions in  $^{235}\text{U}$  from Resonance Capture.

Total Neutron Cross Section and Gamma Ray Spectroscopy of  
 $^{45}\text{Sc}$ .

## NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

NBSにはNeutron Standard SectionのDr. C. D. Bowmanを訪ねた。NBSグループでは標準中性子場、標準断面積に関して主力を注いでいる様で $^{235}\text{U}(n, f)$ ,  $^6\text{Li}(n, \alpha)$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  反応の中性子断面積、特にKeV領域以上について精密測定(精度目標~1%)を進めている。例えば、Dr. A. D. Carlson等はMeV領域の $^{235}\text{U}(n, f)$  反応断面積測定に反跳陽子ラジエータ付き検出器を使用している。Dr. J. A. Grundlのグループでは $^{235}\text{U}$ や $^{252}\text{Cf}$

の核分裂スペクトル形状の測定を行い、特に $^{252}\text{Cf}$  スペクトルを高速中性子領域の標準中性子スペクトル場とすることを提案している。これらの標準場を利用した平均断面積の測定も盛んである。また、 $^{237}\text{Np}(n, f)$  反応は熱中性子領域で殆んど反応しない為、核融合炉に関連した高速中性子領域での標準断面積にと言う提案もある。最後に、印象に残った話の一つは、NBSでは飛行管窓にマイラーではなくKAPTONを使用していることだった。

A New Measurement of the  $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$  Cross Section from  
10 - 500 keV.

A Measurement of the  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  Cross Section in the keV  
Energy Region.

$^{235}\text{U}(n, f)$  Cross Section in the MeV Energy Region.

Doppler-Free Neutron Spectroscopy.

A Gamma Ray Laser Using Existing Technology.

Absolute  $^{235}\text{U}$  Fission Cross Section for  $^{252}\text{Cf}$  Spontaneous  
Fission Neutrons.

Spectral Indices for the BIG-10 Critical Facility: Spectrum-  
Averaged Fission Cross Section Ratios for  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  
 $^{239}\text{Pu}$  and  $^{237}\text{Np}$ .

Evaluation of Fission Neutron Spectra.

Filtered Beams at the NBS Reactor.

## OAK-RIDGE NATIONAL LABORATORY

ORNLではDr. J. A. Harvey に直接ORELAを見学させて頂き、実に多くの方々とお話する機会を得た他、HFIRも見学することができた。ORELAの運転時間は年間実に4000時間から5000時間近いと聞いた。一つの中性子発生用ターゲット(Ta)を幾つもの飛行管が見込む実験配置で、同時に幾組かの実験が平行してできる様になっている。Harveyは、その時Liの中性子断面積実験を行っていた。ORNLグループでも $^{238}\text{U}$ の中性子透過実験の結果から共鳴パラメータの評価を行っている<sup>12)</sup>。私が訪問した時、Dr. de Saussure等は丁度この仕事に一段落が着いた頃の様だった。Dr. Dabbs等は $^{238}\text{U}$ のsubthreshold fission断面積の測定他、

小型の核分裂箱を用いた Cm の核分裂断面積も測定中であった。Dr. Macklin は  $C_6F_6$  検出器等、彼の測定系やサンプル等を見せてくれた。ORNL では、どの実験系を見ても測定系の自動化が目立ち、恵まれた研究環境にあるとの印象を強めた。

The Neutron Capture Cross Section of Natural Silicon.  
Neutron Capture Cross Section of Niobium-93 from 2.6 to 700 keV.  
Average Neutron Resonance Parameters and Radiative Capture Mechanism for the Isotopes of Molybdenum.  
keV Neutron Resonance Capture in Barium-134, 135, 136, 138.  
The  $^{165}\text{Ho}(n,\gamma)$  Standard Cross Section from 3 to 450 keV.  
Gold Neutron-Capture Cross Section from 3 to 550 keV.  
Stellar Neutron Capture in the Thallium Isotopes.  
Measurement of the Neutron Total Cross Section of Sodium.  
Angular Anisotropy in the  $^6\text{Li}(n,\alpha)$  Reaction.  
( $n,\gamma$ ), ( $n,p$ ), ( $n,\alpha$ ) and Total Neutron Cross Section Measurements upon  $^{59}\text{Ni}$ .  
The  $^{238}\text{U}$  Subthreshold Neutron Induced Fission Cross Section.  
High Resolution Measurement of the Neutron Induced  $^{238}\text{U}$  Subthreshold Fission Cross Section.  
Fission Cross Section Measurements on  $^{245}\text{Cm}$  and  $^{243}\text{Cm}$ .  
Resonance Parameters of the 6.67-, 20.9-, and 36.8-eV Levels in  $^{238}\text{U}$ .

#### ARGONNE NATIONAL LABORATORY

ANL の Donald L. Smith とは、RPI 滞在中手紙を交換する機会を得たことから、後日 ANL を訪問することになった。Dr. A. B. Smith の下にはダイナミトロンがあって、D. L. Smith を始め Poenitz, Meadows 等を中心に精力的に研究が進められている。Smith は幾つかの大きい反応断面積の他 Li に関する中性子断面積の測定を行っており、Dosimetry に関連した中性子断面積の測定と評価を中心に、いろいろ意見を交わすことができた。また、Dr. Poenitz と

は鉄フィルタ法による $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 反応断面積について、RPI, BNL, TIT-KUR等の結果を中心に討論することができた。

Cross Sections for Charged Particles from  $^6\text{Li} + d$  Reactions at Low Energies.

Thermonuclear Reaction Rates for  $^6\text{Li} + d$  Reactions.

Fast Neutron Activation Cross Section Studies.

Gamma Ray Production Cross Section Studies.

Total Cross Sections of  $^{182}\text{W}$ ,  $^{184}\text{W}$ ,  $^{186}\text{W}$  and  $^{51}\text{V}$ .

Cross Section Evaluations.

The  $^{234}\text{U}$  and  $^{236}\text{U}$  Fission Cross Sections Relative to  $^{235}\text{U}$ .

Studies on Cross Section Standards.

Neutron Capture Cross Section Measurements.

Fast Neutron Excitation of the Ground State Rotational Band of  $^{238}\text{U}$ .

Fast Neutron Elastic and Inelastic Scattering Studies on  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ , C, V, Fe,  $^{182}\text{W}$ ,  $^{184}\text{W}$ , and  $^{186}\text{W}$ .

The Optical Potential Near  $A=208$ .

最後に、私が米国滞在中感じたことを二、三書かせていただければ、まず研究グループのリーダー自らが現場で率先して働いているのは強味だと思った。全般的に実験法、測定法の合理化、自動化が進んでおり、与えられたものは十分活用している。そして、日本より研究者の数が多く、研究費制度の違いもあって、研究の厳しさ、内容の厚さ等、正にプロ的な意識の高さを感じられ、あらゆる機会を通じて突っ込んだ討論が行われること等が印象的であった。

## 参 考 文 献

- 1) R. C. Block et al. : Meeting on Cross Section Evaluation Working Group, at BNL, Nov. 1976, and Reports to EPRI, and will be Submitted to NSE.
- 2) 小林捷平, R. C. Block and D. R. Harris : 京大原子炉学術講演会要旨集, p.113, 1977年3月.
- 3) R. C. Block, U. N. Singh, K. Kobayashi, R. E. Chrien and H. I. Liou : 4th National Soviet Conference on Neutron Physics, April 18-22, 1977, Kiev, USSR, and Int'l. Specialists Symp. on Neutron Standards and Applications, March 28-31, 1977, Gaithersburg, Maryland.
- 4) Reports to ERDR Nuclear Data Committee, BNL-NCS-21501, Edited by National Neutron Cross Section Center, May 1976.
- 5) R. C. Block, et al. : Phys. Lett., 31(1973)247.
- 6) R. E. Slovacek, et al. : Nucl. Sci. Eng., 62(1977)455.
- 7) R. C. Block, et al. : Proc. of International Conf. on Interactions of Neutrons with Nuclei, at Lowell, (1976) p.1400, and BNL-NCS-21501(1976) p.256.
- 8) 中込良広氏(現在RPIで留学中)私信
- 9) RPI Progress Report, COO-2479-10(1976).
- 10) B. L. Quan : RPI Master Thesis, 1976.
- 11) H. I. Liou and R. E. Chrien : Nucl. Sci. Eng., 62(1977)463.
- 12) D. K. Olsen, et al. : ibid., 62(1977)479.