

JAERI-Review
2002-002



JP0250257



中性子回折の産業利用ワークショップ報告書
— 中性子回折による応力測定 —

2002年3月

中性子科学研究センター
先端基礎研究センター

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子回折の産業利用ワークショップ報告書
—中性子回折による応力測定—

日本原子力研究所
東海研究所中性子科学研究センター
先端基礎研究センター*

(2002年1月11日受理)

このワークショップは、原子炉や、JSNSパルス中性子源からの中性子を、産業界に役立てるために企画された。特にこのワークショップは、中性子回折による応力測定に焦点をあて、2001年10月15日から16日まで東海研究所で開催された。参加者総数は93名であり、その内、産業界からは40名が参加した。

このワークショップでは、JRR-3M原子炉からの中性子を利用した中性子回折法による残留応力測定技術開発の紹介と、原子炉材料、一般構造材料、複合材料、焼入れ鋼、高強度材等の残留応力測定研究が発表され検討された。また、産業界に対し、内部応力測定が新たな製品の開発や製造工程の改善に重要であることが紹介された。産業界からの質問では、測定可能な製品形状・寸法、測定精度、分解能や、建設中のパルス中性子源を利用した内部応力測定装置の設置計画などの質問が出された。専門家からは、応力腐食割れに関する内部応力分布測定についての質問などがあつた。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 東海駐在

(編) 皆川 宣明・盛合 敦・森井 幸生・大山 幸夫

JAERI-Review 2002-002

Workshop on Industrial Application of Neutron Diffraction
-Stress Measurement by Neutron Diffraction-

Center for Neutron Science Tokai Research Establishment
and
Advanced Science Research Center*

Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 11, 2002)

This workshop was planned to make use of the neutron from the reactor and the pulse neutron source JSNS for the industrial world. Especially, this workshop focused on the stress measurement by the neutron diffraction and it was held on the Tokai JAERI from October 15 to 16, 2001. The participant total was 93 and 40 participated from the industrial world. The introduction of the residual stress development of measurement technique by the neutron diffraction method and a research of the measurement of the residual stress such as the nuclear reactor material, the ordinary structure material, the composite material, the quenching steel, the high strength material were presented and discussed in this workshop. Moreover, it was introduced for the industrial world that an internal stress measurement is important for development of new product or an improvement of a manufacturing process. The question from the industrial world about which can be measured the product form, the size, the measurement precision, the resolution, and the installation plan of internal stress measurement equipment using the pulse neutron source under construction. From an expert, there was a question concerning on the internal stress distribution measurement about stress corrosion cracking etc.

Keywords: Neutron Diffraction, Industrial Application, Residual Stress Analysis, JRR-3M, JSNS

* Tokai Site

(Eds.) Nobuaki MINAKAWA, Atsushi MORIAI, Yukio MORII and Yukio OYAMA

2.5.2	薄肉冷中性子冷減速材容器の溶接部残留応力	21
	研究炉部	盛合 敦
2.6	最近の産業利用につながる応力測定研究	22
2.6.1	高周波焼入れによる残留応力とそのコンピュータシミュレーション	22
	高周波熱錬(株)開発部次長	生田 文昭
2.6.2	表面・内部で相変態を持つ材料の応力評価	23
	埼玉工業大学工学部	巨 東英、向井 竜二
2.7	パルス中性子による測定	24
2.7.1	パルス中性子による中性子回折	24
	高エネルギー加速器研究機構	神山 崇
2.7.2	パルス中性子による応力測定	30
	茨城大学工学部 SVBL	鳥居 周輝
2.8	産業利用への意見・要望	31
2.8.1	自由討論	31
	(司会) 先端基礎研究センター	森井 幸生
2.8.2	事前に寄せられたご質問・ご要望	33
3.	出席者リスト	35

Contents

Schematic Drawing of the Diffractometer for Residual Stress Analysis	1
Program of the Workshop	5
1. Development of Neutron Facility in the Intense Proton Accelerator Project	7
Yujiro Ikeda Center for Neutron Science, JAERI	
2. Study on Stress Analysis	9
2.1 Demand for Internal Stress Measurement	11
2.1.1 Needs for Residual Stress Assessment from Materials Engineering Viewpoint	11
Keisuke Tanaka Nagoya University	
2.1.2 Metallurgy Viewpoint	12
“Merit of Neutron Diffraction in R&D, Production and Utilization of Metallic Materials”	
Yo Tomota Ibaraki University	
2.2 Stress Measurement for Material Evaluation	13
2.2.1 Measurement of Phase Stresses in Composite Materials	13
Yoshiaki Akiniwa Nagoya University	
2.2.2 Measurement of Residual Stresses in Structural Components	14
Makoto Hayashi and Shinobu Okido	
Hitachi Mechanical Engineering Research Laboratory	
2.3 Development of Diffraction Technique	15
2.3.1 Residual Stress Analysis Using RESA	15
Nobuaki Minakawa JAERI	
2.3.2 Stress Measurement Using Neutron Image Plate	16
Toshihiko Sasaki Kanazawa University	
2.4 Current Research Topics	17
2.4.1 Residual Phase Stress in Plastically Deformed Pearlite Steel	17
Tetsuya Suzuki Ibaraki University	
2.4.2 Residual Stress in Functionally Gradient Materials and Composite Materials	18
Kazuko Inoue Ryukoku University	
2.4.3 Boundary Stress in W/Ta Target for Neutron Source	19
Kenji Kikuchi JAERI	
2.5 Thin Films Surfaces	20
2.5.1 Stress in Thin Film Material	20
Takao Hanabusa Tokushima University	
2.5.2 Weld Residual Stress in a Thin Wall Neutron Cold Moderator Cell	21
Atsushi Moriai JAERI	

2.6 Recent Study for Industrial Application	22
2.6.1 Computer Simulation and Measurement of Residual Stress Caused by Induction Hardening	22
Fumiaki Ikuta Neturen Co., LTD.	
2.6.2 Evaluation of the Surface and Internal Stresses of Materials with Phase Transformation	23
Dong-Ying Ju and Ryuji Mukai Saitama Institute of Technology	
2.7 Measurement Using Pulsed Neutron	24
2.7.1 Pulse Neutron Diffraction	24
Takashi Kamiyama KEK	
2.7.2 Stress Measurement Using Pulsed Neutron	30
Syuuki Torii Ibaraki University	
2.8 Request and Question on Industrial Application	31
2.8.1 Discussion	31
(Chaired by) Yukio Morii JAERI	
2.8.2 Request and Question Received in Advance	33
3. List of the Participants	35

残留応力解析用中性子回折装置

現在日本原子力研究所では、原子炉から得られる定常中性子線を利用した残留応力解析用中性子回折装置(RESA)が、JRR-3M 研究用原子炉、熱中性子導管 T2-1 ポートに設置されている。第1図に RESA の概要図を、第2図に装置写真を示し、第3図に JRR-3M における RESA 設置場所の図を示す。

本装置は、原子炉で発生した熱中性子が T2 中性子導管を経て第1ポートの単色化機構に導かれた中から、単結晶による Bragg 散乱を用いて単一の熱中性子(単一波長の中性子)だけを選択し、ひずみ測定に用いている。この測定方法は、原子炉から時間的に一定して発生する中性子を用いる場合に有効な方法である。パルス中性子を用いる場合は、パルスの発生する熱中性子(いろいろな波長の中性子)を同時に使用して中性子回折を行う方法で測定される。

中性子回折法による測定原理

中性子回折法は、次に示す Bragg の式(1)により理解できる。

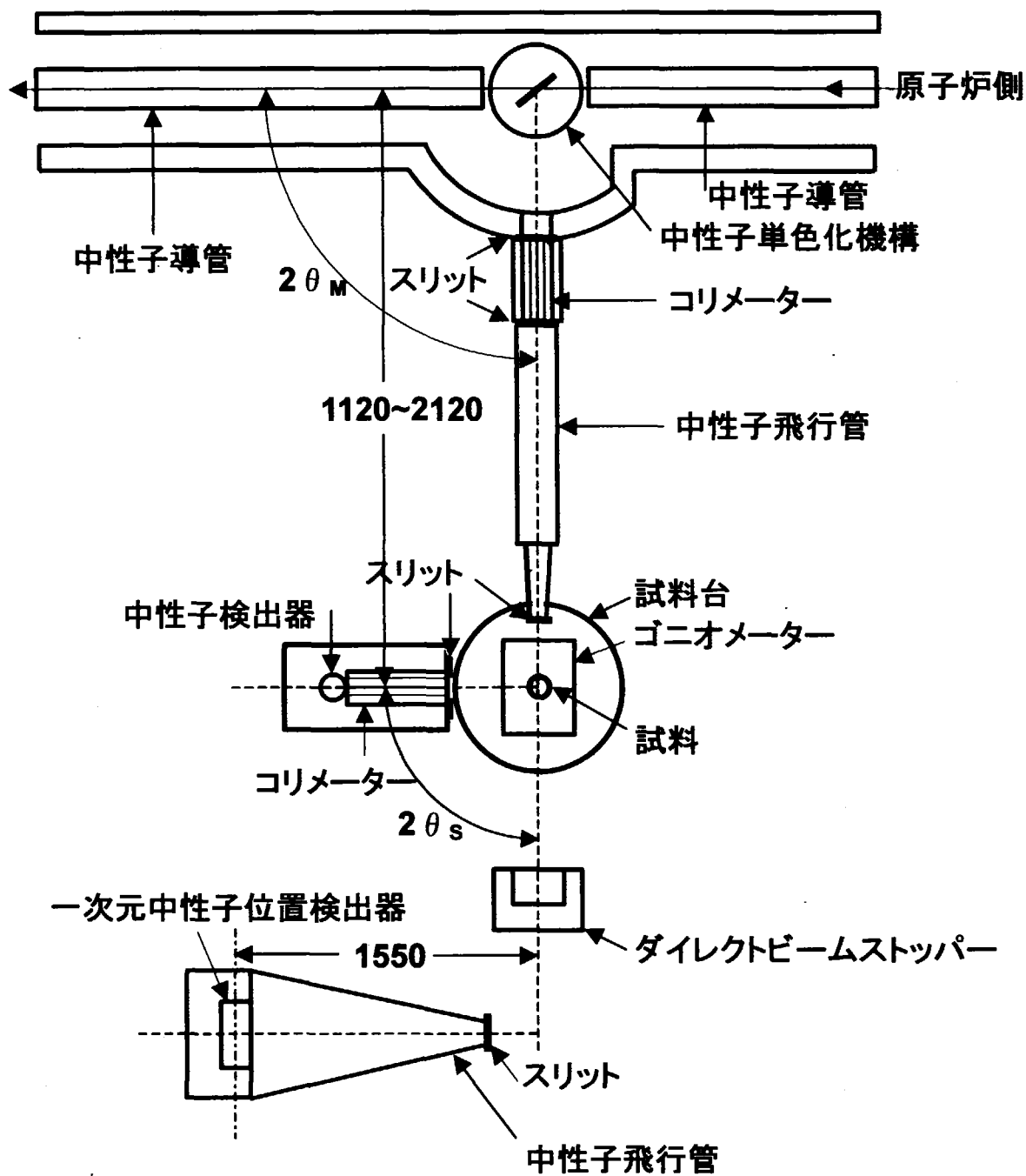
$$n\lambda = 2d_{(hkl)} \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 n は次数、 λ は中性子の波長、 $d_{(hkl)}$ は測定する材料の (hkl) 格子面間隔であり、 θ は回折角である。原子炉から取り出された中性子はいろいろな波長の中性子を含んでいる。 d が一定な単結晶を用いて、任意の回折角に結晶を固定すると、(1)式により単一波長の中性子だけを取り出すことが出来る。この単一中性子を試料台上に置いた試料(材料)に入射することにより、材料の結晶構造から決まる格子面間隔 $d_{(hkl)}$ により Bragg 散乱が起こり、中性子検出器を用いて散乱角(2θ)を走査しながら散乱強度を測定することにより第4図に示すような散乱強度分布(回折強度分布)が測定される。ひずみ ε は、結晶格子間隔の伸縮の変化割合であり第5図に示すような立方晶系結晶構造材料の場合、その伸縮長さ $d_{(hkl)}$ と、無ひずみ状態の $d_{0(hkl)}$ を測定し求められる。

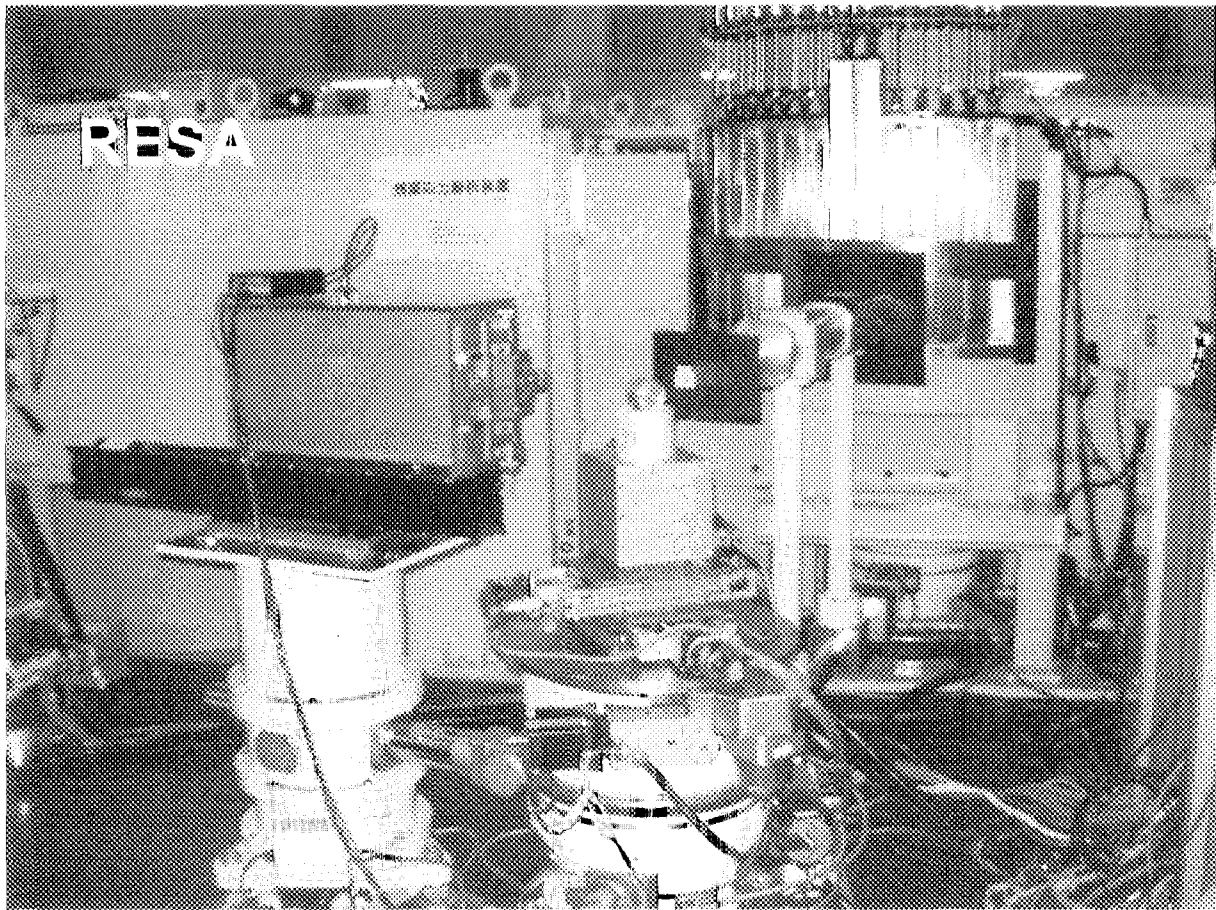
$$\varepsilon_{(hkl)} = \Delta d_{(hkl)} / d_{(hkl)} = (d_{(hkl)} - d_{0(hkl)}) / d_{0(hkl)} \quad (2)$$

ひずみから応力を求めるには、フックの法則より、ヤング率 E とポアソン比 ν を用いて換算することとなる。また、材料の X, Y, Z 3軸方向の応力を求めるためには、各軸方向のひずみ $\varepsilon_{X, Y, Z}$ を測定し、次式(3)を用いて求めることが出来る。

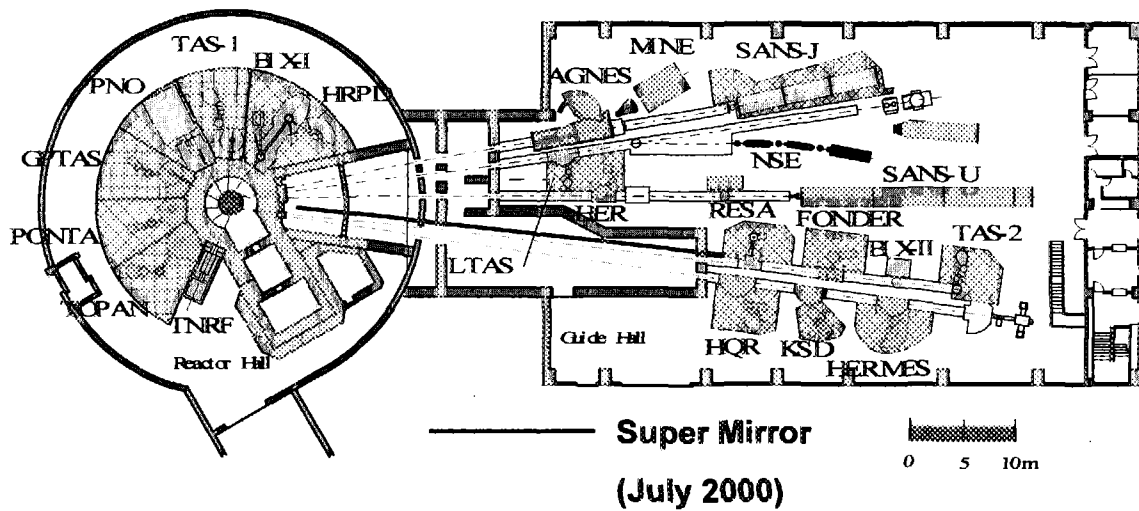
$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



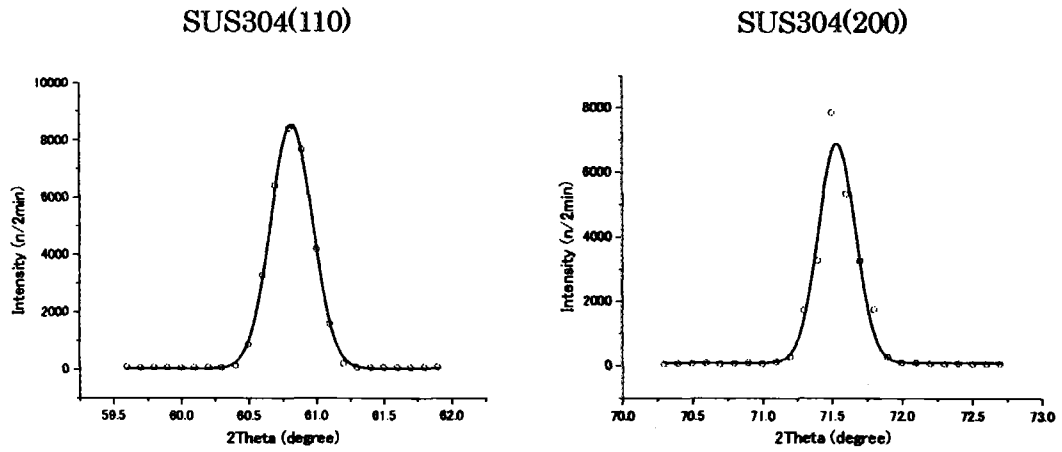
第 1 図 残留応力解析用中性子回折装置概要図



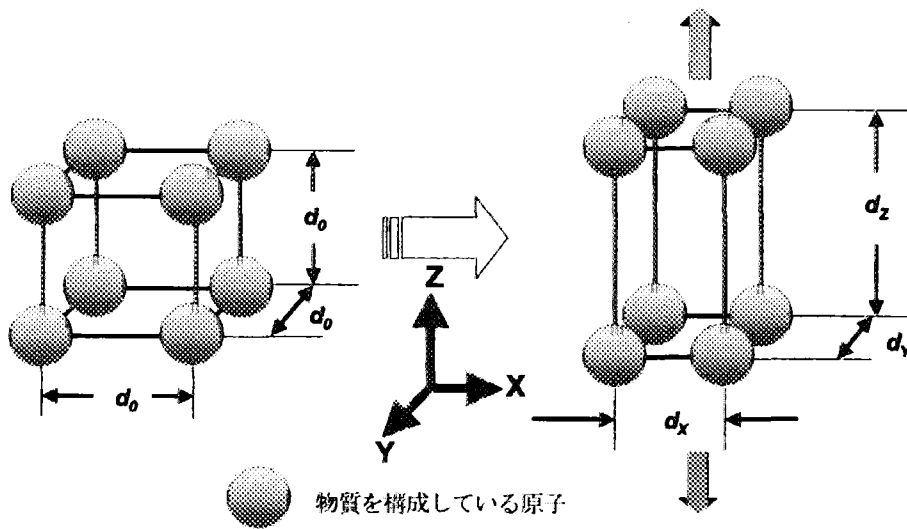
第2図 RESA 装置写真



第3図 JRR-3M における RESA 設置場所の図



第4図 SUS304(110)と(200)の回折強度分布



ひずみ ϵ は、 $\epsilon_{x,y,z} = (d_{x,y,z} - d_0) / d_0$ で表される

第5図 立方晶系の材料に応力を負荷した場合のひずみの例

「中性子回折の産業利用ワークショップ」プログラム

－ 中性子回折法による応力測定 －

主催：日本原子力研究所中性子科学研究センター、先端基礎研究センター

原研の JRR-3M 原子炉に日本初の応力測定専用中性子回折装置が設置されて 8 年が経過し、多くの研究・技術開発が行われてきました。これらの研究・技術開発は直接的、間接的に産業界へ貢献するものが多く、今後更に中性子が利用されると期待されます。そこで、最近行われた研究を検討して、今後の原子炉中性子源や、新しいパルス中性子源を利用した産業利用研究に役立てるため、下記ワークショップを開催致します。

記

期日：平成 13 年 10 月 15 日（月）、16 日（火）

会場：茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所先端基礎研究センター大会議室

10 月 15 日（月）13:00

開会の挨拶	先端基礎研究センター長	安岡 弘志	5 分
大強度陽子加速器計画の中性子施設開発	中性子科学研究センター	池田 裕二	10 分

13:15

1、内部応力測定の必要性

材料工学的立場から 内部応力測定の必要性	名古屋大学工学部教授	田中 啓介	45 分
金属学的立場から 金属材料の研究開発・製造・使用における中性子回折利用のメリット	茨城大学工学部教授	友田 陽	30 分

14:30

2、応力と材料評価

複合材料の相応力測定による材料評価	名古屋大学工学部助教授	秋庭 義明	30 分
実用材料の内部応力と材料評価	日立製作所機械研	大城戸 忍	30 分

15:30

休憩 10 分

15:40

3、測定技術の研究開発

残留応力解析用中性子回折装置 (RESA) と測定技術	先端基礎研究センター	皆川 宣明	20 分
中性子イメージングプレートによる応力測定	金沢大学自然科学科助教授	佐々木敏彦	20 分

16:20

4、最近の研究から

塑性変形したパーライト鋼の残留応力	茨城大学工学部助教授	鈴木 徹也	20 分
複合材料を含む傾斜機能材料の残留ひずみ	龍谷大学理工学部	井上 和子	20 分
中性子源用ターゲット W/Ta 材の相関応力	中性子科学研究センター	菊地 賢司	20 分

17:20

5、薄膜及び表層応力の課題

薄膜材料の応力と製品評価	徳島大学工学部教授	英 崇夫	30 分
薄肉冷中性子冷減速材容器の溶接部残留応力	研究炉部	盛合 敦	20 分

18:30 懇親会

阿漕が浦クラブ

10月16日(火) 09:00

6、最近の産業利用につながる応力測定研究

高周波焼入れによる残留応力とそのコンピュータシミュレーション

高周波熱錬(株) 開発部次長 生田 文昭 30分

表面・内部で相変態を持つ材料の応力評価

埼玉工業大学工学研究科 向井 竜二 30分

10:00

休憩 15分

10:15

7、パルス中性子による測定

パルス中性子による中性子回折

高エネルギー加速器研究機構 神山 崇 20分

パルス中性子による応力測定

茨城大学工学部 SVBL 鳥居 周輝 20分

10:55

8、産業利用への意見・要望

装置利用、測定手法、研究炉、パルス中性子源の利用法等への意見・要望

35分

11:30

閉会の挨拶

中性子科学センター次長 大山 幸夫 10分

11:40 終了

1. 大強度陽子加速器計画の中性子施設開発

中性子科学研究センター 池田裕二郎

中性子が拓く物質科学、生命科学の進展は目覚ましい。中性子源利用の需要の伸びは供給を大幅に越えている。米国では SNS 計画施設の完成に向けて建設が着実に進んでいる。欧州では ESS 計画の推進を加速している。一方、原研と KEK 共同の大強度陽子加速器プロジェクトは 2001 年度に正式予算化され、まさに、本格的な建設段階にさしかかっている。プロジェクトの目玉は 21 世紀の中性子科学研究の原動力として期待されている 1MW パルス核破碎中性子源施設である。

プロジェクト施設は原研東海研の南地区に建設される。400MeV リナック、3GeV シンクロトロン、50GeV シンクロトロンの加速器で加速される最大 1MW の陽子ビームを利用する複合実験施設群で構成される。その中で、1MW 核破碎パルス中性子源は、物質・生命科学実験施設の中性子施設と位置づけられる。プロジェクト建設体制では施設建設に向けて原研と KEK のチームメンバーで構成されるグループ結成し施設の設計及び必要な技術開発を進めている。

中性子線源装置は、中性子発生核破碎ターゲット、モデレーター、反射体、生体遮蔽体等で構成される。陽子ビーム出力は 1MW (3GeV, 333 μ A) で 25Hz パルス周波数である。1MW ビーム出力に対応するために核破碎ターゲット材料として水銀を用いる。設計の詳細化に必要な水銀ターゲットに関する技術開発を急いでいる。高出力中中性子の効率的な減速とビーム取りだしに関するモデレーターの選択、反射体・デカプラー材料の選択、中心部分構造材料選択、中性子要求性能の充足と工学的成立性・製作性、材料損傷による交換寿命の設定、高エネルギー中性子遮蔽性能の確保、ヘリウムベッセル内機器の冷却、中性子シャッター精度確保、ビームライン遮蔽と実験ホールの線量低減、交換機器の遠隔保守性、放射性廃棄物の処理等を考慮した全体系の安全性の担保、安定したビーム供給のための制御性等、全ての構成機器の緻密な設計が要求される。時間的制約及び与えられた予算の中で、これらの設計上の技術課題を着実に克服し、よりよい設計と建設を実現するための活動がいよいよ本格的化する。

中性子利用系の装置・分光器については、最大 25 本のビームラインを設置を目標に施設の基本配置を検討している。個々の装置の特定は今後しかるべくプロセスで行われるが、平成 14 年度から、中性子源装置の詳細設計と一部構造機器の製作開始及び実験建家実施設計に必要な配置とビームライン基本構成及び設備の大枠を設定するためにプロジェクトが主導して 25 本の基本配置案を策定した。今後の検討のベースとなる。実験施設建て家設計を含め装置設計では、利用者の施設へのアクセス及び使いやすさと安全性確保の両面を両立させることが重要な視点である。この講演がプロジェクトの活動の現状について広く理解を深める一助となることを期待するとともに、施設建設を目指した今後の活動に対し皆様のご支援ご協力をお願いする。

This is a blank page.

2. 応力解析研究

This is a blank page.

2.1 内部応力測定の必要性

2.1.1 —— 材料工学的立場から ——

内部応力測定の必要性

名古屋大学 工学研究科 田中 啓介

産業機械や構造物の部材は、使用期間中に外部からの負荷に対して降伏したりあるいは破壊したりしないように設計しなければならない。部材の降伏や破壊を決定する応力は、外部の荷重から計算される応力だけではなく、部材中にすでに存在する「隠れた力」が作用する場合が多い。外部負荷が無い状態で部品材料中に存在する「隠れた力」は、外部からの負荷応力(Applied Stress)に対して、残留応力(Residual Stress)あるいは内部応力(Internal Stress)と称され、部材の性能を支配する。この「隠れた力」を無視したために大変な事故となったケースも多い。したがって、この「隠れた力」の実態を把握することが重要であり、その実態の把握をとおして、これを制御すること、さらに積極的に利用して機器の性能アップにつなげることが可能となる。

本稿では、材料中の内部応力の測定法に焦点を当てて、残留応力の発生、一般的測定法、中性子回折を利用した応力測定法の特徴、残留応力の材料強度への影響、残留応力の利用について述べる。主な項目は次のとおりである。

1. なぜ、残留応力を測定することが必要か。
2. 残留応力はどのようにして発生するのか。
3. どのようにして残留応力を測定するか。
4. どうして中性子回折で内部応力がはかれるのか。
5. 残留応力によって機器の性能はどう変わるか。

2.1.2 内部応力測定の必要性（金属学的立場から）

金属材料の研究開発・製造・使用における中性子回折利用のメリット

茨城大学工学部物質工学科 友田 陽

1. はじめに：

中性子回折の特長はその強い透過能にある。センチメートルオーダーの物体におけるマイクロ組織・力学的情報の3次元空間分布が得られることおよびバルク全体の巨視的平均が得られるために他の測定手段では不可能な知見が得られる。これまでに我々のグループが利用した測定値は、①格子面ひずみ（残留応力を含む内部応力）、②マイクロひずみ（転位密度）、③ブロックサイズ（粒径あるいはセルサイズ）、④正方晶軸比、および⑤集合組織である。これらのデータを外力あるいは温度を変化させながら、弾塑性変形中あるいは相変態中にその場測定できることがきわめて魅力的である。

2. 材料および製品の残留応力測定

残留応力は物体内に不均一な非弾性ひずみ（熱膨張・収縮、相変態ひずみ、塑性ひずみ等）が導入された場合に不整合ひずみを弾性変形で適合するために生じる。金属材料の鋳造、塑性加工、熱処理、溶接（接合）等において、健全な製造や使用上の信頼性の観点から残留応力の把握は重要である。物体内部の応力分布が測定できる点が中性子回折の魅力であり、測定対象体積を小さくすることが今後の課題である。

材料組織学的観点からは、工業材料のほとんどが単相単結晶ではなく結晶方位の異なる粒からなる多結晶体であり、さらに多くは複数以上の構成相からなるので、粒単位の残留応力（相応力）が生じる。複合材料はその典型である。相応力の測定では、巨視的残留応力分布が邪魔になり物体全体の巨視的平均値を知るのが容易でない。精度の高い相応力測定は中性子回折の利用で初めて可能になる場合が多い。

3. 弾塑性変形機構の解明と構造材料開発

（1）変形構成式に関する基礎研究

クリープ変形から地震や自動車衝突における高速変形までをカバーできる変形構成式の構築が望まれている。現在、転位論に基づくアプローチや数理塑性学的アプローチがなされているが、変形中のその場データが得られることが決め手となるであろう。そのためには、応力のみでなく転位密度や組織変化の測定も必要である。

（2）多相合金およびスーパーメタル開発

明石大橋を可能にしたロープはフェライトとセメンタイトの層状組織であるパーライト鋼を伸線して製造される。MG はじめ強塑性加工を利用するとマイクロ組織はナノ組織化するが、ナノ組織材料の強度発現機構は不明で現在大きな関心が集まっている。原子ひとつひとつの配列を観察するのが有効であるが、同時に集合体全体の挙動を知ることが重要である。地球環境負荷の低い材料を開発する決め手は合金元素添加を控えてマイクロ組織制御により特性向上をはかることである。

4. 相変態・組織形成機構解明と材料開発

相変態に伴う内部応力の発生、集合組織形成、動的および静的な回復・再結晶など、組織の造り込みにおいてバルク平均の情報はきわめて有益である。形状記憶合金の特性向上のためのバルク試料その場測定をはじめ多くの課題がある。

5. おわりに

中性子回折は金属材料の開発・製造・安全で効果的な使用において、強力な測定道具であるが、「初めて利用しようという人には敷居が高い」。

2.2 応力と材料評価

2.2.1 複合材料の相応力測定による材料評価

名古屋大学工学研究科 秋庭 義明

近年高機能化を目的として種々の材料の複合化が試みられている。複合材料は、異種材料の組み合わせによって構成されるため、製造過程において熱膨張係数の差に起因する熱残留応力の発生を避けることができない。この残留応力は材料の機械的性質に大きく影響すると考えられるため、これを非破壊的に捉えることは材料の健全性評価のみならず新素材開発に際しても極めて重要となる。特にセラミックス材料は、耐熱・耐食材料として極めて優れた特性を有しているものの、低じん性であることが信頼性を確保する上で大きな障害となっている。これに対して、近年セラミックスの複合化によってじん性を向上させる試みがなされ大きな期待が寄せられている。また、金属材料に対しても複合化による特性改善がはかられている。金属炭化物と純金属からなる超硬合金は、高温における変形量が少なく、高硬度で耐磨耗性に優れるため、種々の機械加工工具として利用されており、熱残留応力や機械加工によって導入される残留応力は、部材の強度に大きな影響を与えるため、それらを非破壊的に評価することは、品質管理や材料開発の際に不可欠となる。

また、複合材料の強度評価には、熱残留応力のみならず負荷状態における各構成相の応力評価が不可欠であり、それらの非破壊的な測定が望まれる。

回折現象を利用した応力測定法は複数の相によって構成される材料の、各相の応力を独立に測定することが可能であり、非破壊的測定法として有力な手法である。X線法は比較的容易に利用可能であることから、多くの分野において適用されているものの、部材の極表面層の情報しか得られないため、三軸状態にある内部の応力情報は得られない。これに対し、中性子法は比較的内部的な応力測定が可能であり、複合材料の応力測定には極めて有効な手法と考えられる。

ここではまず、中性子法を用いて、種々の体積割合を有するジルコニア・アルミナ複合セラミックスおよびアルミナ・炭化ケイ素複合セラミックスの製造過程に導入される熱残留応力を測定し、残留応力に及ぼす第二相の体積割合の影響について検討した結果について報告する。ついで、種々の割合のCoを含むWC-Co合金を用いて、各構成相の熱残留応力を測定し、熱残留応力に及ぼすCo含有量の影響について検討した結果について報告する。最後に、炭化ケイ素粒子によって強化されたアルミニウム合金およびアルミニウム合金単体を用いて、一軸引張荷重下における構成相の各相応力を測定し、マイクロメカニクスモデルによる予測値と比較検討した結果について報告する。

2.2.2 実用材料の内部応力と材料評価

日立機械研 林 眞琴, 大城戸忍

日本原子力研究所 森井幸生, 皆川宣明

1. 背景

機械部品には、熱処理、塑性加工、溶接などが施されており、部品中には残留応力が存在する。この残留応力が影響して、疲労や応力腐食割れが発生することがある。機械構造物の信頼性を確保するためには、加工や接合により発生した残留応力を把握する必要がある。残留応力を非破壊的に測定する方法に関しては、X線回折法と中性子回折法がある。X線回折法は、X線の材料への侵入深さが20 μm であるため、表面での残留応力測定に適しているのに対し、中性子回折法は、中性子の材料内部への侵入深さが鉄鋼材料の場合50mmと深いため、材料内部の測定に適している。本報告では、種々の実用構造物に対して中性子回折法を用いて内部応力を測定した結果について紹介する。

2. 結果概要

2.1 弾性定数の回折面依存性

中性子回折法における残留応力測定では、回折面のひずみ測定が行われており、ひずみから応力に変換するために弾性定数が必要になる。この場合の弾性定数は弾性異方性があるため、各回折面毎に弾性定数を求める必要がある。そこで実験および計算から種々の材料の弾性定数を評価した結果、実験から直接弾性定数を測定する以外ではKronerモデルによる評価方法が有効である事を明らかにした。

2.2 接合部近傍における残留応力分布

溶接、嵌合、圧接等の接合部では、特に残留応力が発生する可能性が高い。そこで、各種接合法の接合部における残留応力を中性子回折法で測定し、有限要素法による計算結果と比較した。その結果、有限要素法と比較して、中性子回折法では、接合前の素材に存在する残留応力も含めた評価が可能であること、また、測定領域内の残留応力を平均化してしまうため、急峻な応力勾配を持つような場合には残留応力を低めに評価する可能性があることが分かった。

2.3 き裂進展に伴う残留応力の再分布挙動評価

溶接部の残留応力は、応力腐食割れの一因となっている。応力腐食割れによりき裂が進展すると、当該部の残留応力が解放されるため、残留応力が再分布し、き裂進展挙動が変化する。残留応力場におけるき裂進展挙動を評価するためには、材料内部のき裂先端部の残留応力を非破壊的に測定する必要がある。そこでき裂進展に伴う残留応力の再分布挙動を、中性子回折法で評価した。その結果、き裂進展に伴うき裂開口部での残留応力の開放および、再分布挙動を中性子回折を用いて測定することが可能であることを明らかにした。

2.4 表面処理材の残留応力分布

ショットピーニング等による表面処理材の残留応力は、その効果が表面近傍であるためX線回折法により測定されてきた。中性子回折法は比較的大きな測定領域を測定するため、表面近傍の応力測定には不適切と考えられてきたが、測定装置や中性子輝度の大幅な改善により、極微小な領域の測定も可能になりつつある。そこで、表面近傍における残留応力を中性子回折法で測定した。その結果、分解能、測定時間に改善の余地が見られるものの、X線応力測定と同等の測定が中性子回折法でも可能であることを確認した。

2.3 測定技術の研究開発

2.3.1 残留応力解析用中性子回折装置(RESA)と測定技術

原研 先端基礎研究センター 皆川宣明

要旨

材料は引張ることにより伸び、圧縮することにより縮む。その時、材料を構成している結晶粒の原子間距離は伸び、縮みする。この変化を中性子回折法を使って測定出来る。中性子はX線と異なり、内部まで侵入出来る。そのため、材料内部を非破壊で測定することが出来る。ひずみ ε は、 $\varepsilon = (d_{hkl} - d_{0hkl})/d_{0hkl}$ *で表され、フックの法則より弾性定数 E 及びヤング率 ν を用いて、応力 σ に換算することが出来る。残留とは、字のごとく、材料、製品中に残存するひずみ、または、応力のことであり、例えば、円柱を作るため、素材をミーリング機械により切削し製作した際、切削加工応力が加わり、完成後、内部で全体に安定した形になろうとする力が働き、応力が発生し残存する。更に、切削された材料を用いて次の製品に加工すると、次の工程で受けた応力に対する残留応力が発生する。ここでは、A7075材を用いたリングとプラグの冷やし詰め試料を製作した際の、加工残留応力について紹介する。また、日本原子力研究所が1994年にJRR-3M原子炉、中性子導管室に設置した残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を紹介する。この装置を用い、最近までに行った代表的な測定及び、研究開発を以下に示す。

(1). 材料評価のための研究開発

- ① 炭素鋼を曲げ塑性変形させた試料の、内部応力分布測定
- ② 繰返し応力で疲労させた試験片断面の残留応力分布測定
- ③ 溶接配管の応力分布測定
- ④ VAMAS TWA-20のRound robin試料の測定
- ⑤ 複合材料SiC/Al₂O₃、Cu/Cr、SiC/Ti等の相関応力測定
- ⑥ セラミックス材の応力測定
- ⑦ 核融合材料超伝導コイル被覆材として用いているINCOLOY材の内部応力分布測定
- ⑧ 核融合炉構造材の、溶接部応力分布測定
- ⑨ 傾斜機能材の応力測定
- ⑩ 冷中性子源用液体水素容器の応力分布測定
- ⑪ 焼入れ鋼の応力分布測定
- ⑫ パルス中性子源用陽子標的材の加工応力評価

(2). 測定技術・装置研究開発

- ① 残留応力測定用中性子回折装置の開発
- ② 中性子イメージングプレートを用いた応力測定法の開発
- ③ 集光型モノクロメーター開発
- ④ 集合組織測定装置の開発
- ⑤ 無ひずみ d_0 測定装置の開発測定
- ⑥ 一般構造材の、ヤング率、ポアソン比のデータベース作成

* d_{hkl} は、ひずんだ状態のミラー指数面間隔。 d_{0hkl} は無ひずみ状態のミラー指数面間隔。

2.3.2 中性子イメージングプレートによる応力測定

金沢大学 佐々木敏彦

中性子イメージングプレートは中性子用の新しい 2 次元的検出器であり、測定面積が比較的大きことや、幾何学的形状の自由度があるなどの利点を持つほか、従来の中性子検出器と比較して計数率や位置分解能にも優れており、中性子回折研究への新たな貢献が期待されている。本研究は、工業的に重要な構造物の残留応力測定に対し本中性子イメージングプレートの応用を検討したものである。

中性子イメージングプレートでは図1に示すように回折環の全体または大部分を一度に記録可能であり、得られるひずみの1個あたりの測定時間は大幅に短縮できる。また、回折環全体から求まる多数(約 300 個余)のひずみデータを用いて非破壊による内部応力分布の評価など、比較的複雑な解析に利用できる可能性がある。また、一般に行われているディフラクトメータを用いた中性子応力測定からの残留応力分布を基に回折像をシミュレーションし、これを中性子イメージングプレートによって得た実測結果と対比させることで、両方法の結果に最も収束する残留応力分布を得るという利用も考えられ、測定の信頼性向上に有効と思われる。

上記のような展開を視野に入れ、本研究ではその第一歩としてその基本となる薄板(厚さ 2mm の炭素鋼)の平均応力測定について基礎的な検討を行った。本テーマはX線イメージングプレートでは既に容易なものとなっているが、中性子イメージングプレートでは予想以上に手間取り、最近ようやく可能な段階になった。まず、図 2 は図 1 の回折像から画像解析を経て回折環半径分布を求めた結果である。3 種類の引っ張り応力を与えたときの変化を示している。薄板の中性子応力測定では残留応力の影響は小さく、無負荷時の半径が一定でない原因は中性子ビームの侵入深さが本試験片の全体に及ぶことに関係すると判断される。この点は、シミュレーション結果からも確認されている。一方、図 2 から正確に応力を求めるため、無ひずみ時の回折環半径の分布を基に、負荷状態下の回折環データからこれを差し引く方法について検討した結果、図3に示すように理論予測値とよく一致する結果が得られた。また、同様なシミュレーション結果も実験とよく一致した傾向が得られた。

現段階での本平均応力測定法は、数 10 μm 以上の厚さを持つ被覆層や金属/セラミクス間の接合層などの残留応力状態の評価に利用できると思われる。一方、中性子イメージングプレートによる応力測定は通常のディフラクトメータのような精密装置を必要としないものの、同様なひずみ精度を画像解析および撮影装置により達成する必要があり、これらの一層の進歩が本方法の今後の展開において重要である。

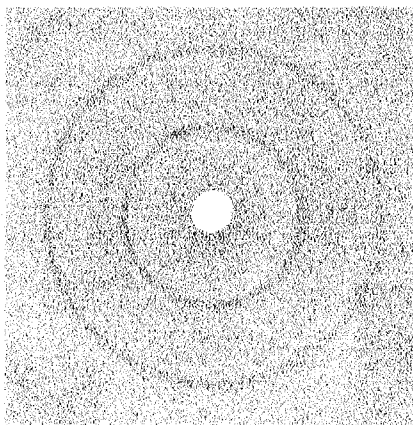


図 1. 中性子回折像の例

(Fe 211 回折、内側：基準材料、
中央：試験片、外側：基準材料)

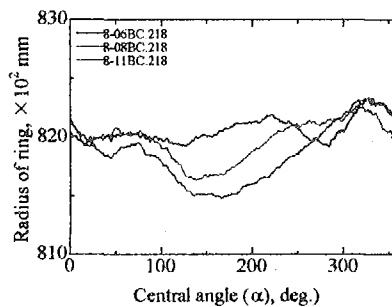


図 2. 中性子回折環の半径分布
(負荷応力: 下: 0, 中央: 120 MPa,
上: 240 MPa)

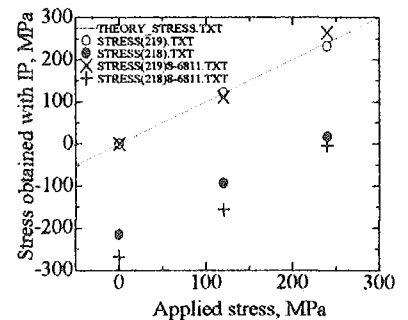


図 3. 応力測定結果
(○: 本方法、●: 未補正、×
+: シミュレーション結果
直線: 理論値)

2.4 最近の研究から

2.4.1 塑性変形したパーライト鋼の残留応力

茨城大学工学部超塑性工学研究センター 鈴木 徹也

1. 緒言：

パーライト鋼が塑性変形を受けると構成組織であるフェライトとセメンタイトに残留応力が発生する。高強度化を目指した組織設計を行うためにはこの残留応力の情報を正確に把握することは重要である。本研究では、バルク材の平均情報を得る手法として有利な中性子回折により、伸線パーライト鋼の残留相応力を測定した。

2. 実験方法：

日本原子力研究所の RESA を用いて θ - 2θ 法により、伸線パーライト鋼のフェライトの残留相応力を測定した。試料の組成は 0.85C, 0.24Si, 0.82Mn, 0.011P, 0.01S, 0.02Al, 0.05Cr (mass%) の過共析鋼である。パーライト組織を得るためのパテンティング処理を施した P1、断面減少率で約 75% の伸線加工を施した P2、423K, 12.6ks の時効処理を施した P3、Zn メッキ処理条件の 698K, 0.6ks の焼鈍を施した P4、球状化処理(963K, 18ks)を施した P5 を試料として用いた。伸線加工方向と測定面法線の角度を変えて残留応力を測定した。また、上記の P1~P5 について、伸線加工方向に対して角度を変えて試験片を切り出し、圧縮強度の方位依存性を調査した。

3. 結果：

Fig. 1 にフェライトの {110} 面に関しての残留相応力の測定結果を示す。P2 材および P3 材には 0° 方向すなわち、伸線方向に強い圧縮の残留応力が認められた。P1, P4, P5 材は残留応力の異方性を示さなかった。このことより、伸線加工により導入された残留応力は Zn メッキ処理程度の焼鈍により、ほぼ除去されることが分かる。Fig. 2 に圧縮試験の結果を示す。この場合も P2 および P3 材にのみ強度の異方性が確認された。また、別の実験で P1~P5 の引張と圧縮の降伏応力を比較したところ、P2 および P3 材のみに引張と圧縮の降伏応力に差が認められ、引張の方が降伏応力が高いことが分かっている。この降伏応力の異方性は Fig. 1 の残留応力の結果によりよく説明できる。

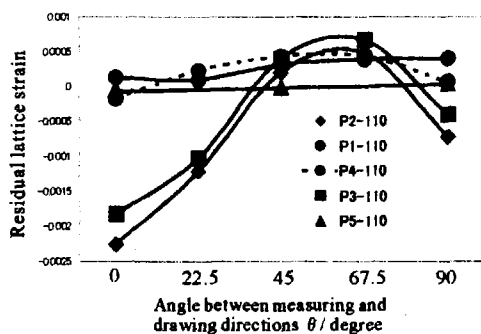


Fig.1 Residual elastic strain in the ferrite matrix as a function of the angle from the drawing direction.

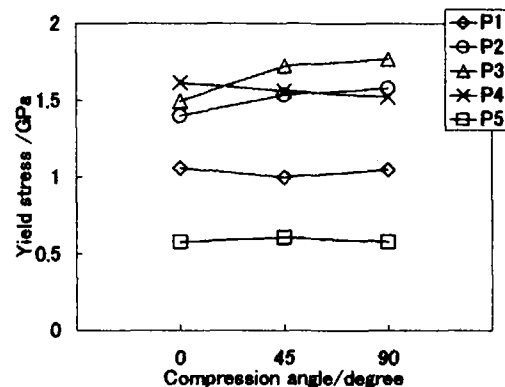


Fig.2 Yield stress changes with an angle between the compression and the drawing direction.

2.4.2 複合材料を含む傾斜機能材料の残留ひずみ

龍谷大学 理工学部 井上和子

傾斜機能材料を作製する目的で異種材料を接合した場合に接合面および材料内部に生ずる残留応力を、中性子回折を用いて測定することを試みている。測定に用いた試料は、直径 40mm、各層の厚さ約 4mm の円盤状 3 層構造材である [WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni] および [WC-10mass%Ni]-[SUS304]-[WC-10mass%Ni] と、比較のための単層の [WC-10mass%Ni]、[Ni] および [SUS304] である。また、本来の超硬合金である複合材料 [WC-10mass%Co] および比較のための [Co] の測定も行った。いずれの試料も燃焼合成法で作製し、合成前の原料として、WC, Ni, Co では粉末を用い、SUS304 のみ板状のブロックを用いた。

測定には、JRR-3M に設置された RESA および KENS の Sirius を用いた。RESA では、小さく絞った一定波長のビームを利用するため、試料内部の各位置で 3 方向の測定が可能である。しかし、ビームを絞るため強度が弱く、特に試料内部を測定する場合には時間がかかるため、測定できる散乱ピークは各材料に対して通常 1 つである。一方、Sirius では、TOF 法の背面反射で、広範囲の試料からの全部の反射を一度に観測するため試料の各位置でのひずみの情報は得られないが、Rietveld 解析を行って各相の格子定数を非常に精度よく決定することが出来る。

測定結果の一例として、3 層構造材 [WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni] について、RESA で測定した Ni からの (200) ピーク、および Sirius で測定した回折像と RIETAN-2001T を用いた Rietveld 解析の結果を示す。

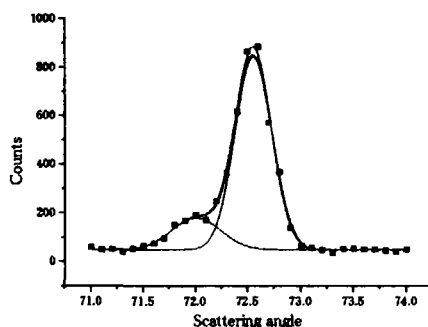


Fig. 1 Reflection from Ni (200) for radial direction at the center of the sample, [WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni], observed by RESA at JAERI.

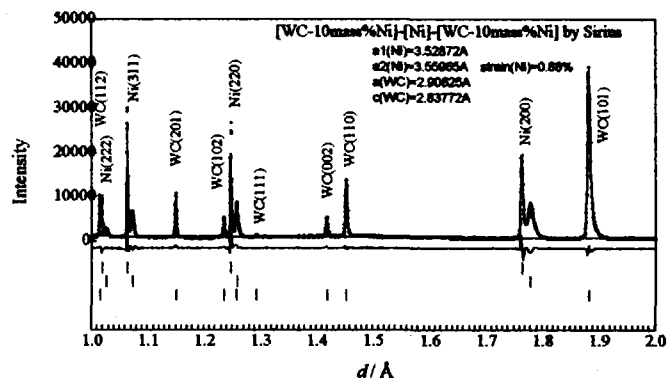


Fig. 2. Diffraction pattern and the results of Rietveld analysis of the sample, [WC-10mass%Ni]-[Ni]-[WC-10mass%Ni], observed by Sirius at KENS.

いずれの測定結果からも、[Ni]層からの散乱ピークと、[WC-10mass%Ni]層中の Ni からの散乱ピークが明らかに分離している様子が分かる。RESA による試料各位置での測定から、[Ni]層はどの位置でも殆どひずみを受けておらず、また、[WC-10mass%Ni]層中の Ni は、位置に関係なく複合材料としてのひずみを受けており、そのひずみは各位置によって 0.72~0.80% の間に分布していることが分かった。一方、Sirius による試料全体からの回折像を Rietveld 解析して決定した格子定数からは、[WC-10mass%Ni]層中の Ni の受けるひずみが、0.88% と求められた。Sirius によるひずみの方が多少大きめに得られ、両測定法の違いについて検討中である。

2.4.3 中性子源用ターゲット W/Ta 材の相関応力

日本原子力研究所 菊地賢司、皆川宣明、盛合 敦、森井幸生
 高エネルギー加速器研究機構 川合将義、古坂道弘
 東北大学 李 敬鋒、栗下裕明

まえがき

中性子源用のターゲットであるWとTaをHIP接合した界面の残留歪みを測定した。Wは固体ターゲットとして優れているが、陽子照射及び冷却水による腐食に弱いため、Taで被って使用する。このとき、WとTaの間に隙間があると、除熱が進まないため、十分に接合させて使用する。接合は試料に高温高圧を長時間負荷し、いわゆる拡散接合で製作した。条件は1500度C、2000気圧で3時間である。X線分析では拡散長さは4ミクロン程度であった。そこで、接合強度評価の目的で、接合境界部に残留している歪みを、中性子回折で測定した。

実験準備と手順

用いた試料は粉末から焼結したW、Taであり、中性子回折用に作製した。直径約10mm、高さ45mm、厚さ1mmのTa筒に、はめあいの精度に加工したTaとWの円筒を半割にし、もとのTa筒に入れ、別のTaの蓋をし、HIP 処理した。

実験手順は

- ・原子炉から取り出した中性子ビームの波長確認
- ・ビーム内強度分布から最適ビーム中心の選択
- ・WとTa粉末回折より、無歪み状態の格子長さ測定
- ・中性子ビーム照射体積、照射時間、試料回転角度刻み幅、測定点数の実験計画立案
- ・試料内集合組織の調査(今回は省略)

スリット幅は0.35mmに狭めて、境界部からの分布を測定できるように狙った。

測定結果とまとめ

回折測定結果をもとに、ブラッグの式から半径方向と円周方向の格子長さを求め、歪み分布の評価を行った。半径方向歪みは、W側でやや引張り、Ta側で数千マイクロの引張りであった。円周方向歪みは、W、Ta側とも数千マイクロの引張りであった。実験時間が足りず、軸方向歪みは測定できなかったため、3次元応力にはまだ換算できていない。しかし、12000気圧の中で拡散接合した結果、境界近傍には引張りの歪みが残っていることを確認できた。

2.5 薄膜及び表層応力の課題

2.5.1 薄膜材料の応力と製品評価

徳島大学工学部 英 崇 夫

薄膜コーティングのねらいと用途

薄膜コーティングのねらいは、基板材料の表面に異種材料を複合化して新しい機能を実現し、部品の長寿命化と高信頼性を確立することにある。たとえば、自動車や航空機等の機械部品への耐摩耗性、低摩擦性、耐熱性の付与、さらに、切削工具や金型工具への高強度、耐高温摩耗特性、低摩擦性、切れ味などの機能を与えるためにコーティングがなされる。また、工作機械や自動車部品の摺動部の耐摩耗性付与など用途はいたるところに広がっている。

薄膜の生成と残留応力

薄膜コーティングには種々の方法があるが、特にCVDおよびPVD法は表面改質の手法として急速な拡大を見せている。CVD法は800℃～1100℃の高温での化学的応用を利用する方法であり、各種雰囲気中に置かれた基材の表面に硬質のセラミックス膜が生成される。PVD法は低温での物理的応用を利用する方法であり、処理温度も400℃～500℃どまりである。

このような基材への異種材料のコーティングは、両者の熱膨張係数や弾性定数の違いにより薄い皮膜の中に熱残留応力を発生するのが常である。また、特にPVD法では膜生成に基づいて膜自体が持つといわれる真応力があり、しばしば異常に高い残留応力となる。また、条件によっては結晶の配向性も異なり、これが膜の性質に影響を及ぼす可能性がある。

残留応力の測定

膜の残留応力測定の方法には、たわみ法とX線（中性子）回折による方法がある。たわみ法は膜を形成する前後の基板のたわみ（曲率）の差から生成された膜中の残留応力を測定する手法であり、X線法（中性子）法は薄膜を構成する結晶の格子ひずみから応力を求める手法である。CVDやPVDで形成された膜は多くの場合繊維配向を持っている。この条件下では、X線応力測定法に述べられている $\sin^2\psi$ 法が基本条件とする結晶のランダム配向性を持たないので、任意のX線入射角において回折線を得ることが不可能になる。繊維配向を有する構造においては、結晶学的条件から回折線の得られる方向を指定して、2方向以上の格子ひずみを測定し応力を求める手法が確立されている。中性子法も基本的に同一原理で応力測定が可能である。

安定な膜のために

成膜直後あるいは使用中に、膜面にクラックが発生したり膜そのものが基板からはがれたりすることがある。いずれも急激な温度変化や力の付与により急速に進展することが多い。クラックの防止策としては、膜と基板の密着性の向上と膜応力の低減が効果的であると考えられる。前者は基板と密着性の良い材料を選択すること、基板と膜の間に密着層を形成することなどが考えられる。後者の対策としては、熱膨張係数差の検討、膜材質の傾斜化、また、膜形成条件、保護膜の種類、下地膜の種類などを考慮することによって調整が可能ではないかと思われる。

残留応力低減のため、また、複合的な機能を持たせるために多層膜、積層膜、傾斜膜などの方法が得策であると考えられるが、残留応力の様子は単層膜に比べて極端に複雑になる。それぞれの層の残留応力を把握することが膜の評価には大切になるが、X線では下部層の膜の測定は困難である。中性子やシンクロトロン放射光による応力測定が有効になるであろう。

2.5.2 薄肉冷中性子冷減速材容器の溶接部残留応力

原研東海 研究炉部
盛合 敦

1. 緒言

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構とで共同で推し進められている大強度陽子加速器建設計画の、中性子散乱実験施設に設置される中性子減速材容器の残留応力について測定したので報告する。減速材容器とは、高エネルギー陽子をターゲット材に衝突させた際の核破砕で生成する高速の中性子(数 eV 以上)を、中性子回折・散乱実験に使用する低速の中性子(数 10 meV 以下)に減速するための冷却装置(冷媒溜め)であり、冷媒には液体水素が用いられる。容器は、核発熱の除熱、中性子利得の点等を考慮して、中性子通過部分で 2 mm の薄肉の設計となっている。また、容器は、バルク材から三つのパーツに別個に削り出した後、溶接して組み立てる工法を採っている。本研究では、ときとして有害となるこれら一連の製造プロセスによる加工残留応力を、中性子回折法によって明らかにし、容器の供用前の健全性の確認はもとより、長期の安定かつ安全な操業に資することを目的に実施した。

2. 実験

Fig.-1 に、供試材である中性子減速材容器を示す。容器材料は、アルミニウム合金 JIS A7N01-T6(Al-Zn-Mg-Cu 合金)である。容器の形状は複雑な曲面から構成される平たい水筒形である。容器材料の板厚は中性子通過部分で 2 mm、側面で 4 mm である。容器は、管台部、上胴部、下胴部の三つのパーツを別個にバルク材から削り出したのち、A5356 を溶接金属として TIG 溶接(一部 YAG レーザー溶接併用)により各パーツを接合して製作されている。溶接継手は V 形開先の突合わせである。

中性子回折による残留応力測定は、原研研究用原子炉 JRR-3 に設置する、残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を用いて行った。入射単色中性子の波長は 0.2099 nm である。測定箇所は、Fig.-1 に示すように、上胴部と下胴部の溶接線を垂直に横切る方向の長さ 20 mm にわたる下胴部の母材である。この箇所について、直交三軸方向(図中座標 x, y, z)のひずみを、2 mm φ孔のカドミウム製スリットにより入射中性子を絞ってゲージ体積を制限して測定した。ひずみゲージとしての回折格子面は、Al の 111 を選んだ。

3. 結果

Fig.-2 に、容器の三軸方向の残留応力分布を示す。三軸方向とも溶接線中心からの距離 $z = 2$ mm から 5 mm までは引張りの状態であり、最大で 250 MPa の引張りの残留応力となるが、A7N01-T6 材の室温における引張強度 $\sigma_b = 365$ MPa は超えてはいない。 $z = 6$ mm から 12 mm では、 x 方向と y 方向はほぼ同じ値の圧縮応力を示すが、 z 方向がさらに圧縮側の値をとる。 $z = 13$ mm 以降では、 x 方向と z 方向のひずみと応力の変化が引張側に転じるのに対し、 y 方向はさらに圧縮側に変化するという結果となった。

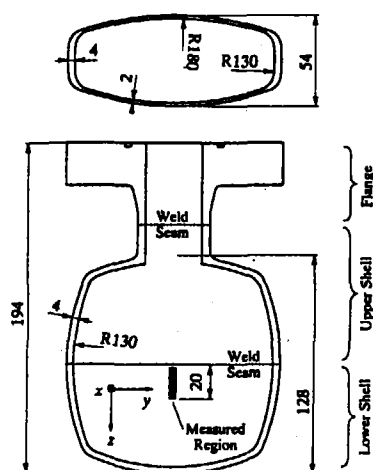


Fig.-1 A cut-away view of the neutron cold moderator cell for high-intensity proton accelerators.

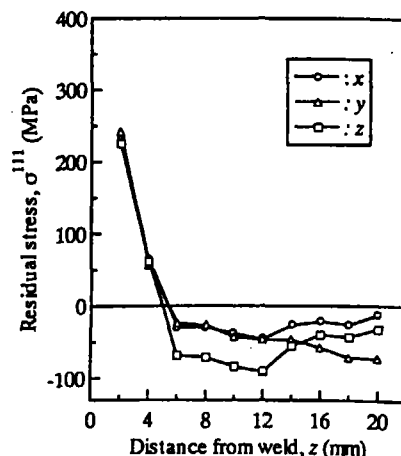


Fig.-2 Residual stress in the near weld base metal of an A7N01-T6 moderator cell.

2.6 最近の産業利用につながる応力測定研究

2.6.1 高周波焼入れによる残留応力とそのコンピュータシミュレーション

高周波熱練 (株) 生田 文昭

1. はじめに

高周波焼入れは耐摩耗性、疲労強度、じん性の向上を目的とした表面硬化法の一つで自動車部品、工作機械部品などに多く適用され高強度化、小型化に役立っている。熱処理後の硬化層分布、残留応力分布および変形は製品の品質に大きな影響を与えるが、それらの発生メカニズムは複雑で特に、ワーク形状が複雑な場合、その予測が困難であった。最近、コンピュータの著しい進歩とともにこれらのシミュレーションが可能になってきている。ここでは「磁場-熱-変態-力学」の連成解析を基本にした高周波焼入れのコンピュータシミュレーションにより円柱試片の温度分布、残留応力、寸法変化、組織変化等の解析を行い実験結果との比較を行った。表面の残留応力の測定には微小部 X 線応力測定装置を用い、内部の残留応力については中性子回折法を用いた。

2. 磁場-熱-変態-力学理論

高周波焼入れ過程においては、Fig.1 に示すように磁場、温度、金属組織および応力/ひずみが相互に影響を及ぼし合うため、これらを連成で解く必要がある。誘導磁場による渦電流がマックスウェルの電磁方程式、温度の場が熱伝導方程式、相変態による材料の組織が相変態カイネティクス、応力/ひずみの場が弾性/非弾性構成式によって連成を考慮しながら求められる。

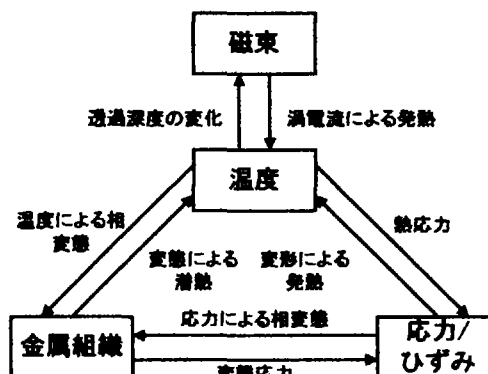


Fig.1 磁場-熱-変態-力学的連成

3. シミュレーション結果と実験結果との比較

3-1 焼入れ実験

試験片は S45C 鋼円柱で直径 20mm、長さ 60mm である。50k Hz の高周波電源により加熱時間 8.5 秒で 950°C に加熱後、噴射冷却を行った。

3-2 シミュレーションおよび実験結果

磁場解析プログラムには FEM の MAGNA を熱処理解析プログラムにはやはり FEM の HEARTS を使用した。

冷却の熱伝達率は同寸法の銀試片に熱電対を埋め込み、冷却曲線から逆計算にて求めた。Fig.2 は中央断面の残留応力分布である。表面の残留応力は接線方向、軸方向成分とも高い圧縮となっており硬化層深さまでがほぼ圧縮でそれより深い部分では引張りとなっている。表面の残留応力値は X 線による計測値と良い一致が見られる。中性子回折法による内部の残留応力については別途紹介する。

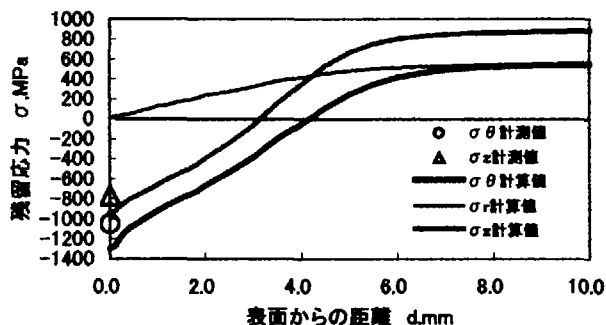


Fig.2 円柱試片中央断面の残留応力分布

2.6.2 表面・内部で相変態を持つ材料の応力評価

埼玉工大 巨 東英、埼玉工科大学院 向井 竜二

1. 緒言 材料の熱処理を行う場合、必ず材料内部に応力が残る。この残留応力は従来の X 線回折法では、材料の表面に生じた応力しか測定できなかったが、中性子回折を用いると材料内部の 3 次元残留応力を詳細に測定することができる。しかし、焼入れなどの熱処理を行う場合、種々の相変態を生じるため、材料の微細組織を伴った残留応力の測定は非常に困難である。本研究は中性子回折測定技術を用いて、各種焼入れを行った時の相変態を持つ材料の残留応力を測定し、その結果と問題点について検討する。

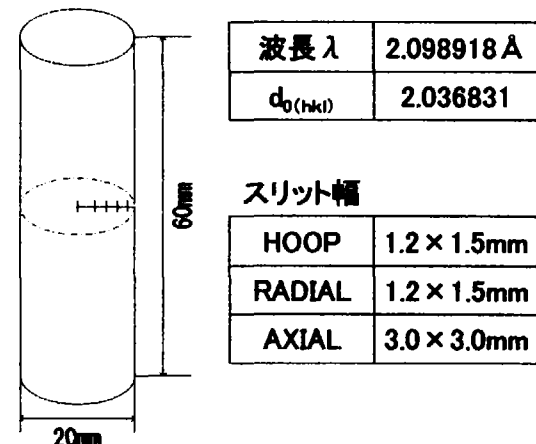
2. ヤング率とポアソン比の測定 今回測定した材料は、炭素鋼 S45C の焼入れ前と後である。焼入れ方法は、約 850℃まで加熱した後、水で焼入れを行った。中性子回折によって焼入れ材の残留応力を測定するため、まず格子面 (110) についての

Table.1 Young modulus and poisson ratio.

焼入れ	ヤング率 E	ポアソン比 ν
前	242.430 GPa	0.278479
後	217.751 GPa	0.221170

その結果を Table.1 に示す。結果より、焼入れ後の材料内部にマルテンサイト相が生じたため、ヤング率とポアソン比の変化が生じた。

3. 試験片と測定条件 残留応力の測定を行った、S45C 水焼入れ円柱試験片の寸法と残留応力の測定条件を Fig.1 に示す。測定位置は、円柱長さ方向の中心部 (×30mm) であり、中心から表面までの 5 点の 3 次元残留応力を測定した。



4. 残留応力の測定結果 水焼入れ後の円柱試験片の中心から表面にかけての 3 次元残留応力が測定できた。残留応力測定結果を Fig.2 に示す。結果を見ると、半径方向の表面付近で圧縮応力が高くなっている。これは、今回使用した無ひずみ格子間隔 $d_{0(hkl)}$ が引張り試験片で測定したもので、ほぼマルテンサイト相の状態の場所を測定しており、円柱の中心付近のパーライトなどが多い場所では誤差が生じてしまったものと思われる。

Fig.1 Specimen and measurement conditions.

この誤差を無くすためには、それぞれ異なった相がある場合、測定場所ごとに $d_{0(hkl)}$ を測定する必要があるのではないかとと思われる。

謝辞 協力研究制度により、このような研究が出来ることに対し、感謝する。

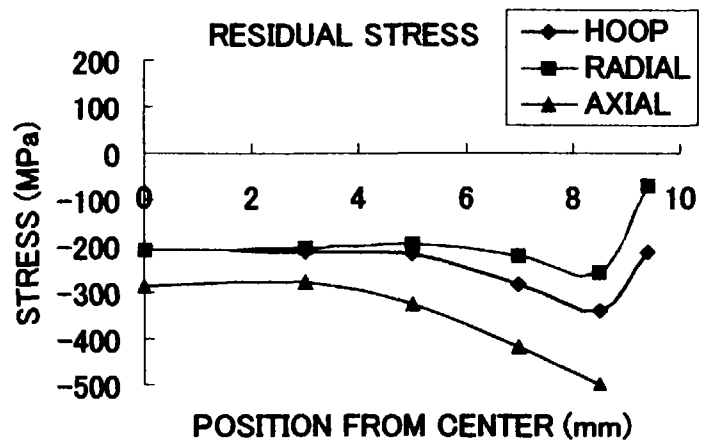


Fig.2 Measured results of residual stresses.

2.7 パルス中性子による測定

2.7.1 パルス中性子による中性子回折

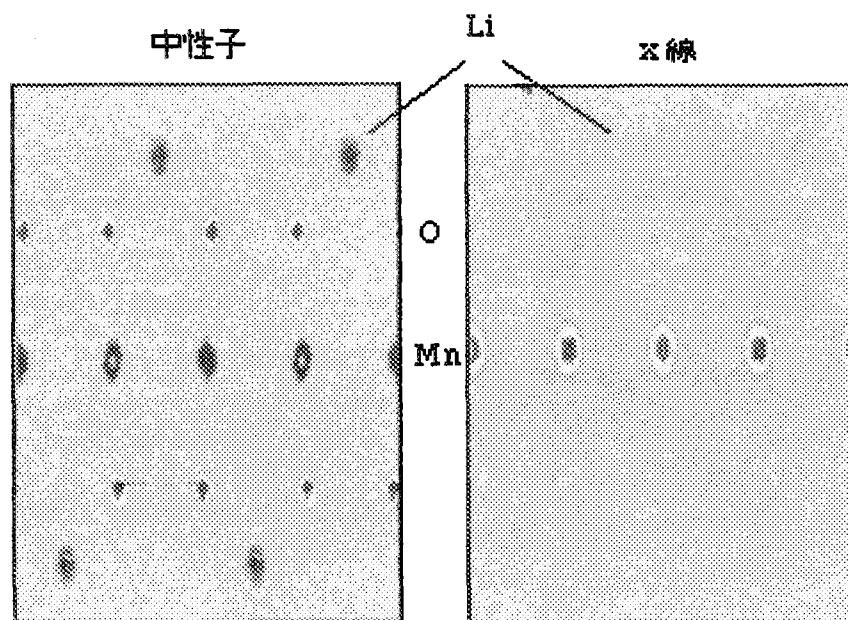
高エネルギー加速器研究機構 神山 崇

1 粉末中性子回折装置

1.1 中性子回折とX線回折

粉末中性子回折は高温超伝導体の出現を契機として固体物理や無機化学に定着し、今や材料科学などのさまざまな分野にも広がってきた。粉末X線回折とは違い以下の特徴がある：(1) 散乱振幅 b_c が原子番号に比例せず、原子番号が近い材料の構造研究や、重元素と軽元素を含む物質の構造解析等に有利、(2) b_c は散乱角 2θ にまったく依存しないため、小さな格子面間隔 d の情報まで有効利用可能、(3) 粉末X線回折では選択配向が避けがたいが、粉末中性子回折では中性子の透過能が高いために選択配向は僅かである。一方、中性子残留応力測定ではもっぱら中性子の透過能が高いことを利用するが、(1)の特徴を利用できる場合もあるだろう。

Liイオン電池や燃料電池への期待から、Li原子やH原子に注目が集まっているが、X線は電子を見ており、これら軽元素に対しては、中性子回折に基づく結晶構造解析に大きな期待が集まる。図1は普通のLiMn₂O₄(Liスピネル)のフーリエ図でありX線でははっきり見えない酸素が中性子回折でははっきり見える。X線フーリエ図ではLiの位置が間違ったところに見える。



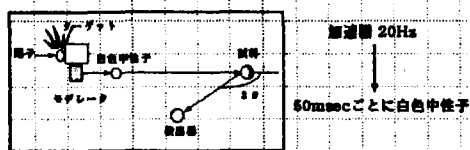
正極材料のフーリエマップ

図1 Liスピネルのフーリエマップの比較

1.2 TOF型中性子回折

パルス中性子源を利用した回折装置は、白色中性子を用いた波長分散型(エネルギー分散型)の測定法がとられる。すなわち検出器は固定されブラッグ反射を起こす波長を調べる方法である。陽子加速器により加速された陽子がTa, W等のターゲットに衝突すると、高速のパルス中性子が発生し、それが水

素を多量に含む減速材により減速されたのち、白色パルス中性子としてビーム孔より取り出される。中性子の速度の違いを反映して、発生後試料を経て最終的に検出器に到達するまでの時間 t が異なってくる。中性子の速度を v 、減速材から試料を経て検出器に至る距離を L とすると、中性子の速度は $v=L/d$ により決定できる。この式をド・ブロイの関係 $\lambda=h/mv$ (λ :中性子の波長、 h :プランクの定数、 m :中性子の質量)に代入すると $\lambda=ht/mL$ となり、 t から λ が求まり、さらにブラッグの条件から格子面間隔 d が計算できる。



ブラッグの条件 $\lambda = 2d \sin \theta$
 角度分散型 白色中性子 → 検出器2θをスキャンする
 エネルギー分散型 白色中性子 → 検出器をスキャンする

我々の場合陽子加速器は20Hzで運転されているので50ミリ秒ごとに波長分布を持った白色パルス中性子が生じ、波長によって検出器に到着する時刻が異なることから、波長を知ることができる。通常の実験では0.1 Åから10 Å程度までが利用され、その中性子速度が数km/secと遅いため波長は大変精度良く求めることが出来る。この方法は、その方法の特徴から飛行時間(time-of-flight: TOF)法と呼ばれる。

中性子の波長、速度、飛行時間の関係

波長λ (Å)	速度(km/s)	40mを走る時間(km/s)
1	4	10 msec
2	2	20 msec
4	1	40 msec
10	0.4	100 msec

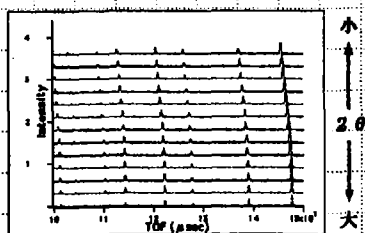
$\lambda \propto 1/v$ (中性子の速度) $\propto t$ (中性子の飛行時間)

中性子飛行時間法 (TOF法)

最近我々は斬新な光学系を採用した、2台のTOF型高分解能回折装置を開発し、高エネルギー加速器研究機構に設置した。角度分散型粉末回折装置では、分解能を上げるためにスリットを用いるので立体角が制限されるが、TOF型ではそれが不要である。しかし、従来の装置では通常の棒状³He検出器を水平面上に並べていたため大きな立体角を取れなかった。これはそれまでのTOF型粉末回折装置が歴史の長い角度分散型粉末回折装置の延長線上でつくられていたことによる。そこで我々は位置敏感型検出器(PSD)を試料を取り囲むように立体的に敷き詰めることを考えた。費用や検出器バンクの大きさ、メンテナンスの容易さを考慮し、一次元PSDを多数並べた構造とした。数百に及ぶ検出器の回路の費用を大幅に軽減し、さらにエンコーディングやヒストグラミングを行わせるため、独自のデータ処理システムを開発した。

ブラッグの条件 $\lambda = 2d \sin \theta$

$$t = \frac{2mL \sin \theta}{h} d$$



中性子がPSDの一つ一つのピクセルでカウントされるたびに、時刻(エネルギーに対応する)と位置の情報がイベントデータとして一時記録され、コンピュータにより即座に処理されて回折強度のヒストグラムがつけられる。従って、デバイシユア環に沿って強度を足しあわせることも容易である。立体角は角度

分散型粉末回折装置の100倍に達した。これにより中性子ビーム強度が弱い施設ながら大強度と高分解能を実現した。

最近完成した2台目の装置は一層高強度・高分解能を目指したもので、40mに及ぶ中性子飛行距離(減速材から試料を経て検出器に至るまでの距離)を持つために分解能が高い。さらに飛行距離の大部分で世界で初めてスーパーミラー製中性子導管を用いることにより高強度を実現した。

2. 中性子残留応力測定法の進展

残留応力測定装置は、世界各地の中性子散乱施設でも早急に本格的に取り組むべきだとして、急ピッチで設置が始まっている。国内でも原研の地道な取り組みが最近の高い評価へとつながっている。米国のSNSで計画されているVULCANの性能はISIS(英)やILL(仏)で建設中のものに比べても十数倍、世界的に既設の標準的な装置と比較すると数十から数百倍と予想されている。しかし加速器施設での残留応力測定は、原子炉施設でのそれに比べ、技術的蓄積が極めて少ない。統合計画を進めるためには、今後、一層の技術的経験を蓄積することが肝要である。このような観点から1999年より友田、鈴木、ハルヨ(茨城大)らと2相ステンレス鋼などの残留熱応力測定、引っ張り応力下でのその場中性子回折実験、福永、小野(京大原子炉)らと一方凝固複合材料の残留歪み研究、土屋(筑波大)と接合材、井上(龍谷大)と複合材料の残留応力研究を行ってきたが、最近、森井、皆川、盛合(原研グループ)、秋庭(名大)と装置建設のための共同研究を開始した。

3. TOF 回折装置の分解能 $\Delta d/d$

ブラッグ反射の間隔を d 、半値全幅(FWHM)を Δd とすると分解能は $\Delta d/d$ で定義される。これは近接したブラッグ反射の分離の程度を表す。 $\Delta d/d$ が小さいほど高分解能である。分解能 $\Delta d/d$ は次式(1)で近似できる。ただし、減速材で発生する中性子のパルス波形 Δt は、他のガウス分布的プロファイルと異なり線形に足されるとした。

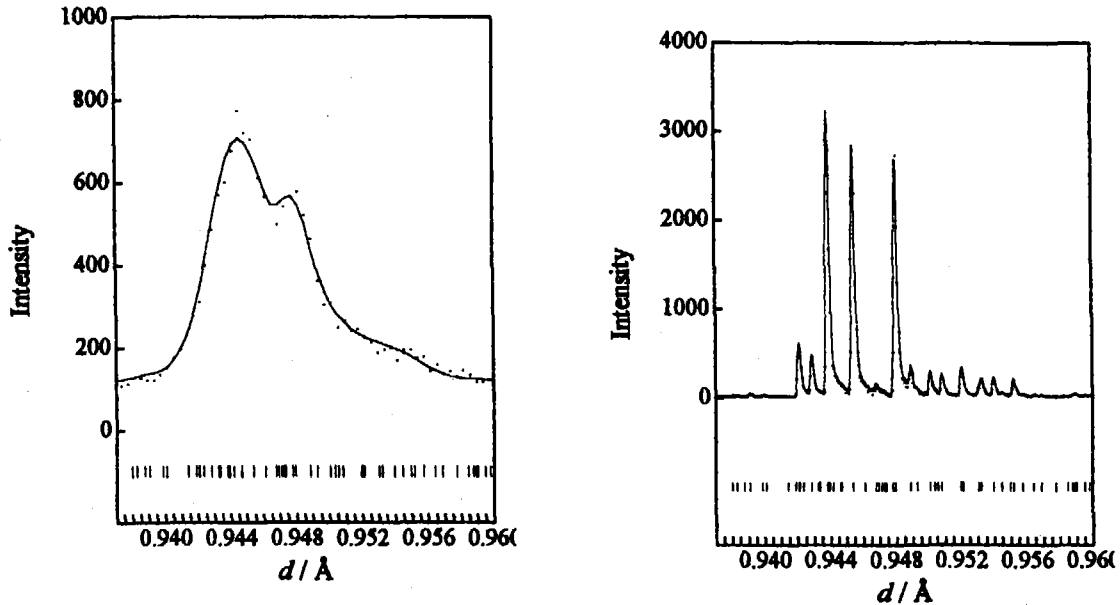
$$\Delta d/d = \Delta t/t + [\{ (\Delta L_s)^2 + (\Delta L_c)^2 \} / L^2 + \{ (\Delta \theta_1)^2 + (\Delta \theta_2)^2 \} \cot^2 \theta]^{1/2} \quad (1)$$

第1項は飛行時間 t の誤差(時間分解能)、第2項は飛行距離 L の誤差(距離分解能)、第3項は散乱角の誤差(角度分解能)である。第1項の Δt は主に減速材からでてくる中性子のパルス幅で、減速材の大きさの効果も含んでいる。第2、3項は試料(S)や検出器(C)が有限な大きさをもつために生じる幾何学的な効果である。第4項の $\Delta \theta_1$ は試料への入射ビーム角の誤差で、ガイド管を用いるかどうかで異なる。 $\Delta \theta_2$ は散乱ビーム角の誤差で、試料と検出器の大きさおよび両者間の距離の関数である。TOF型粉末回折装置で高分解能を実現するためには、上式の三つの項をそれぞれ小さくすればよい。すなわち、試料位置を中性子源から離して L を長くする(t も大きくなる)と、時間分解能および距離分解能がよくなる。一方、第3項は $\Delta \theta \cot \theta$ の形になっているから、検出器をできるだけ背面反射($\cot \theta \approx 0$)の位置にすると小さくなる。在留応力の実験においてはゲージボリュームを正確に決めるために $\theta = 90^\circ$ 付近が重要となる。

4. シミュレーションと解析

モデレータの性質・性能により装置の基本的な性能が左右される。必要な性能を発揮した装置設計を行うために、パルス幅、裾、S/Nなどの吟味が重要で、それらを調べ要求性能を明らかにするため、シ

ミュレーションを行っている。以下の図では仮想的な結晶構造の構造パラメータから構造因子をhklごとに計算し、それを McStas に入力し回折パターンを得たものである。Tick マークはブラッグ反射である。



$\Delta d / d$ (現在の高分解能装置 Vega) $\sim 0.3 \%$

$\Delta d / d$ (統合計画, 最高分解能) $\sim 0.03 \%$

5. 残留応力測定装置の分解能, 空間分解能等の設定の指針について

5.1 分解能 $\Delta d / d$

ISIS の ENGIN は $\Delta d / d = 7 \times 10^{-3}$ で, LANSCE の NPD の 90 度バンクは $\Delta d / d = 2.5 \times 10^{-3}$ だとされている。一方背面反射に近づけることにより分解能を容易に上げることができるが, 次に述べるゲージボリュームの精度が低くなる。原研の RESA は, 最高分解能 $\Delta d / d = 3 \times 10^{-3}$ 程度であり, $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 歪みが求められるとしている。リートベルト解析では回折プロファイルが非対称であってもプロファイル関数が完璧にプロファイルを表現できていれば構造解析上の問題は少ないとされる。ブラッグ反射の近くに別なブラッグ反射が来たときは, 立ち上がりのシャープさが長所になり, 立ち下りの緩やかさが短所となる。しかし試料起源のブロードニングはたたみこみの形でプロファイルに反映されるため, 最小二乗法で局所解を作る原因となりやすい。非対称プロファイルのピーク位置の accuracy には問題がある。したがって, モデレータはプロファイルがシャープで対称に近く, 裾が極力少ないことが必要である。 現在計画中である ISIS の ENGIN-X, PSI の POLDI, SNS の VULCAN ではどれも, 90 度バンクでの最高分解能を $\Delta d / d = 2 \times 10^{-3}$ としている。これを実現するためには α_1, α_2 をかなり小さくする必要がある。

5.2 空間分解能

ゲージボリュームは溶接部の場合には厚さの 1/10 程度で良いとされるが, クリープなどのように粒内, 粒界での歪みを調べていく場合には 1mm 以下である必要があるとされる。しかし, 装置の制約からビームライン方向のゲージボリュームを小さくするのは容易でない。現在の RESA の最小のゲージボリュームは 3x3x3mm 程度と聞いている。したがって最小のゲージボリュームとして 1mm³ が達成できれば理想的

である。SNS の VULCAN では、3Dマッピングでは 1mm^3 、1Dマッピングでは 0.1mm との報告がある。

5.3 検出器

90° での分解能 $\Delta d/d$ を高めるためには、検出器ピクセルは散乱角方向に最小ゲージボリューム程度であることが望ましいが、それに垂直方向へはずっと大きくてよい。その程度はテクスチャー走査間隔程度の $1-2^\circ$ 程度となるだろう。

回折線はある程度の立体角(これまでの経験では角度で 5° 程度)まで足しても求まる応力の精度は落ちないので、測定時間を短くすることが可能である。これは、 90° 検出器の立体角を大きくすることに対応する。

一方、バルク材のテクスチャーを調べることも必要である。すなわちバルク試料全体にビームにさらして極点図・逆極点図をもとめるものである。多くの場合 1° から 5° 程度の間隔で方位を走査できれば充分である。

5.4 スリットとラディアル・コリメータ

入射スリットは、その幅が正確に define でき、アジャスタブルであることが必要である。すべてコンピュータ制御するために、モータドライブ、かつ、自動でアジャストされることが望ましい。散乱ビームを制限しサンプリング体積を小さく正確にするために、ラディアル・コリメータを用いる。サンプリング体積が 1mm^3 の場合は、ラディアル・コリメータを試料に十分近くに設置する必要がある。SNS の VULCAN では、10個のラディアル・コリメータを1200万円で作製するという。全体のテクスチャーを測定したり、テクスチャーのない材料の実験ではラディアル・コリメータを取り除く必要がある。ラディアル・コリメータは取り外し可能で、位置の再現性が確保される必要がある。サンプリング体積が 1mm^3 の場合、その $1/10$ 程度が必要と考えられ、十分な検討が必要である。

5.5 チョッパー、ガイド管などの利用

残留応力測定では広いQ範囲を用いないが、大型の鉄鋼材料を試料として用いることが多く、かつ、測定後、試料を返却することもあるため、放射化を減らすためTOチョッパーかcurved guideを用いる。

5.6 その他

台座は十分な重量に耐えながら、平行移動、回転などが可能とする。引張試験機、高温炉などは当初から不可欠で装置の一部とみなす必要がある。これらには原子炉での経験が生きるだろう。TOF法による残留応力測定は、角度分散法を用いた残留応力測定に比べ、実験は比較的複雑な手続きが必要で、さらに、大規模なデータが得られることに特徴がある。そのため、ソフトウェア開発は軽視できず、早い段階から十分な力を注いで開発していく必要がある。LANCE の SMARTS, ORNL の NRSF に加え SNS の VULCAN, ENGIN-X でも LabVIEW を検討しているようである。今後十分な情報交換が望ましい。

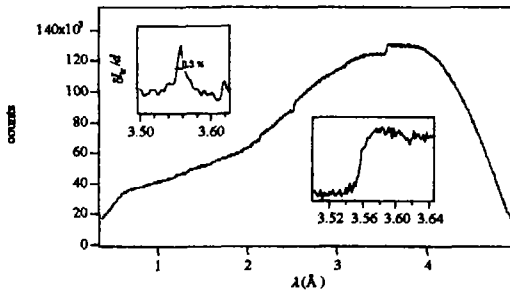
5.7 新しい可能性

「粉末測定装置との相互乗り入れ」残留応力測定は、粉末測定装置としての新しい可能性を秘めている。一例としてさまざまな材料から構成される電池を挙げれば、残留応力測定装置の空間分解能を用いることで、充電放電過程における構成材料の変化をそれぞれの部位で追跡することが可能となる。逆に高い空間分解能を必要としない実験も多く、高い分解能 $\Delta d/d$ をもつ粉末回折装置を用いることが

可能となる。

「ブラッグエッジの利用」TOF 回折では白色光を用いるので、透過ビームのブラッグエッジを利用できる。そのエッジ位置は背面配置での $\lambda = 2d \sin \theta$ で決まるから、カットオフ位置の精度は、挿入図にみるように背面バンク並に高い。ブラッグエッジ位置の移動は、ビーム方向の面間隔のずれを試料内部で積算した値になる。積算することで、ビーム方向の情報が失われるが、トモグラフィの手法を用いれば、内部の歪み分布が求められる可能性があるのではないだろうか。さらに、入射ビームのサイズを太くし、透過位置に二次元PSDを設置すれば、ブラッグエッジのイメージングが容易にできるはずである。ただし、X線CTの場合は吸収であり、透過からはスカラー量が求まるのに対し、この方法で求めたいのはテンソル量である歪みであるから、試料を何らかの方法で情報を追加する必要があるだろう。

一方、透過ビームをそのままイメージングし、試料中のどこを狙って残留応力実験するかの判断材料とすることも可能である。しかし、この点は、超音波によるイメージングを装置に設置した方が効率が良いだろう。



アルミ合金のブラッグ・カットオフ

今後、将来用途として検討しなくてはならないのが、照射した試料の測定であろう。これを人が行うと被爆するのでロボットの導入が必要である。さらにホットラボが近くにあること、装置自身が他の装置から隔離されていることが必要である。そのためには通常の残留応力測定装置と照射した試料用とを分ける必要があるかも知れない。

6. まとめにかえて

統合計画プロジェクトにゴーサインがでて以降、急ピッチにプロジェクト準備作業がすすめられている。粉末回折分野、残留応力測定分野でも装置提案をしているが、どのような研究が展開されるか見通しながら、今後、装置の詳細を詰めていく必要がある。そのためには多くの研究者のコメントが必要である。中性子源などのデザインは本格的に始まっており、早急に設計方針を定める必要がある。

2.7.2 パルス中性子による応力測定

茨城大学大学院理工学研究科 SVBL 鳥居 周輝

【緒言】

残留応力は疲労破壊を引き起こす原因の一つと言われ、その測定には超音波や X 線などが用いられてきた。中性子は、X 線などに比べ物質への貫通力に優れ、物質内部の情報を容易に取り出すことが可能である。この中性子内部応力測定は疲労破壊を避けなければならない分野、原子炉、飛行機、タービン、エンジン、化学プロセスの配管、自動車など多岐の分野で脚光を浴びている。世界各地の中性子散乱施設でも構造物の安全性向上のため、中性子内部応力測定は本格的に取り組まれ、それらの装置は急ピッチで設置が始まっている。しかし、パルス中性子を用いた残留応力測定は日本国内では前例がなく、海外でも限られた例があるのみであり、技術的蓄積が極めて少ない。統合計画における残留応力測定装置を設計しつつある今、技術的経験を蓄積することが急務である。

【パルス中性子による引張り試験その場観察】

2001 年 4 月、高エネルギー加速器研究機構の高分解能中性子回折装置 *Sirius* に引張り試験装置を導入した。*Sirius* の検出器には 1 次元位置敏感型検出器 (PSD) が用いられており、散乱角 $2\theta = 90^\circ$ である 90 度検出器バンクが試料チャンバーの左右に設けられている。引張り試験装置を中性子入射方向から 45 度傾けて設置することにより、引張り軸方向のマイクロ歪み (格子面間隔の伸び)、それに垂直なマイクロ歪み (格子面間隔の縮み) を効率的に得ることができる。

—IF 鋼を用いた引張り変形その場中性子回折実験—

今回導入した引張り試験装置の有効性を確認するため、IF 鋼を用いた引張り変形その場中性子回折実験を行った。各引張り荷重下で約 20 分の測定時間を要し、十数点の異なる荷重で測定を行った。一回の測定で多数の格子面反射を同時に観測でき、マイクロ歪みを効率良く収集できることがわかった。

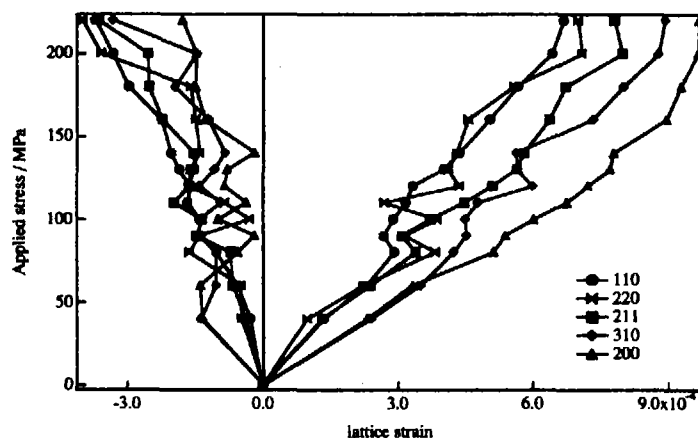


図 1 IF 鋼の各反射面の応力—歪み特性

2.8 産業利用への意見・要望

2.8.1 自由討論

司会・記録 原研先端基礎研究センター 森井幸生

1. JRR-3M の利用

先端基礎研究センター森井より JRR-3M に設置の RESA を使用して残留応力解析を行う方法について、中性子散乱協力研究、共同研究制度を中心に説明があった。これに対する質問・意見と回答の主旨は以下のとおりである。ここで、{注:} は記録者が後日確認した情報である。

質問：JRR-3M の一般利用の費用はいくらか？

回答：1 装置を 1 年間占有する場合、ガイドホールでは年間 1000 万円程度、炉室では 1500 万円程度である。{注：正しくは、炉室の場合年間 2000 万円程度である。}

質問：残留応力の空間分布を求めるときの空間分解能は？

回答：中性子ビーム強度で空間分解能を決める測定領域（いわゆるゲイジボリューム）の大きさが決まる。現在ビームサイズは 3mm^2 （例えば $1\text{mm} \times 3\text{mm}$ あるいは $0.35\text{mm} \times 10\text{mm}$ ）程度である。大強度陽子加速器計画ではビーム強度が強くなるので 0.01mm^2 （例えば $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ ）に近づく。

質問：試料の形状・重量の許容限度は？

回答：通常のゴニオメーターの天板は直径 30 cm 円形である。{注：耐荷重は 200 kg である。} 並進移動のみを行う四角ゴニオメーターなら、 $20 \times 20 \times 10\text{cm}^3$ 、30 kg 程度である。

質問：照射誘起応力腐食割れの研究では応力解析が重要である。照射物の残留応力解析は可能か？

回答：RESA は現在のところ照射物を取り扱うための RI 取り扱い施設になっていないので、許認可を取るための検討を進めている。低い放射化物の場合、運搬容器と RESA 側での追加遮蔽を組み合わせると中性子回折実験が可能かなど今後検討する。

質問：残留応力の空間分布を測定する努力が払われてきているが、今後も同様か？

回答：同様である。

要望：利用者の増加を実感している。来年度のマシンタイム割り当てが少なくなると恐れている。何とかならないか？

2. KENS の利用

高エネルギー加速器研究機構神山助教授より KENS の利用について、研究公募制度、ひずみ解析精度、企業が占有する場合の利用料金（3.5 万円 / 時間）などについて

説明があった。

3. 大強度陽子加速器計画での中性子源利用

中性子科学研究センター大山より2007年からのビーム利用に向けて、装置の開発設置、利用方法などについて検討を進めていることが説明された。また、装置実現のために、広範な利用者の要望が寄せられることや建設への積極的な参加が求められていることなどの指摘があった。これに対する質問・意見と回答の主旨は以下のとおりである。ここで、{注:}は記録者が後日確認した情報である。

質問：装置建設グループはどのように形成されるのか？何台の装置を建設するのか？

回答：現在、どのような装置を建設すべきかという提案を纏めている段階である。実験装置懇談会において詳しく検討してもらい、しかるべき承認を得た後、予算要求を開始する予定である。

2.8.2 事前に寄せられたご質問、ご要望

質問1、今後、照射され、放射化した材料の中性子回折を実施される予定、計画はありますか。

回答

現在、原研、各企業研究開発機関より、原子炉材料照射試料の内部残留応力測定のご要望が出されています。残留応力解析用中性子回折装置(RESA)は、高線量試料を測定するための放射性物質使用施設許可を受けていません。また、装置構造も高線量の γ 線に対する遮蔽を行っていませんので、現状では実施困難です。また、RESAを放射性物質使用施設に改造するためには、遮蔽体建屋を製作し、その中に装置全体を収納せねばなりません。そのためには、測定する試料の線量にもよりますが、総重量100トン前後の遮蔽体建屋を設置せねばなりません。RESAが設置されている中性子導管室の、耐床荷重は、3.5(トン/㎡)であり、現在の装置荷重だけで安全基準内目いっぱいです。低い放射性物質の場合、RESA側で追加遮蔽を施せば、中性子回折測定が可能であるか否かを今後検討致します。

2005年に稼働が予定されている大強度陽子加速器のパルス中性子施設には、照射材料用残留応力測定装置の設置希望を出していますが、実現させるためには、希望者がまとまり、設置利用について具体化して行く必要があります。

質問2、中性子回折による内部応力測定について、測定精度(データのばらつき)は、どの位あると考えれば良いのでしょうか。X線と同程度はあると考えられるのでしょうか。

回答

中性子回折法では、X線に比べ大きな測定部容積の内部平均ひずみ(応力)を測定しています。ひずみ(応力)測定部容積は、入射側と反射側に設けるスリット寸法、回折角度と、入射ビームの広がりによって決まります。測定される平均ひずみ(応力)の精度は、単色化中性子の波長の広がり $\Delta\lambda/\lambda$ 、測定強度、装置の機械的設定角度精度等で決まります。RESAは、世界トップクラスの1000分の5度の設定精度を持つ装置であり、分解能 $\Delta d/d$ は 2×10^{-3} です。通常分解能の10分の1程度まで正確に Δd を求めることが出来るので、アルミ材の場合得られる応力値精度は、 $\pm 14\text{MPa}$ 程度で測定できます。

質問3、パルス中性子を用いる場合には、現段階よりもビームの径や強度が良くなると思うのですが、どれ位内部応力測定に反映されてくるのでしょうか。

回答

原子炉を利用した中性子回折法は、原子炉が稼働中、いろいろな中性子エネルギー(波長)が混在して出力される中から、モノクロメーターにより、単一波長の中性子を取り出して、測定試料に入射しその散乱ピークを測定します。パルス中性子発生装置では、混在した中性子エネルギー(波長)が、パルス状の時間間隔で出力され、その混在波長のほとんどを散乱ピーク測定に利用します。そのため、原子炉の単色化中性子に比べ実効的に強度が強くなります。しかし、同時に多くの散乱を計測せねばなりませんので、検出器のエネルギー特性、時間特性、計測機器の処理特性等が測定精度及び効率に影響します。また、試料内部の散乱位置の決定法に特殊なコリメーターを用いる等のテクニックを必要としますので、その性能により中性子強度、測定精度が左右されますが、総合的に原研内に設置される大強度加速器によるパルス中性子源を用いてのひずみ測定では、現在の JRR-3M 原子炉を用いたひずみ(応力)装置に比べ2倍以上の精度向上、数十分の一の測定時間短縮が可能となります。

今後のご意見ご要望等は以下へお寄せ下さい。

日本原子力研究所

中性子科学研究センター

大山幸夫 029-282-6809 oyama@cens.tokai.jaeri.go.jp

先端基礎研究センター

森井幸生 029-282-6093 morii@neutrons.tokai.jaeri.go.jp

3. 出席者リスト

This is a blank page.

	芳名	会社名	所属	役職	会社〒	会社住所	E-mail	電話番号	FAX番号
あ	相澤 一也	中性子科学センター	中性子利用開発グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	aizawa@neutrons.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6936	029-282-6496
	相澤 淳一	(財)日立地区産業支援センター		コーディネーター	316-0032	日立市西成沢町4-33-15	aizawa@hits.or.jp	0294-25-6121	0294-25-6125
	秋庭 義明	名古屋大学	工学研究科	助教授	464-8603	名古屋市中区千代田区不老町	akinriwa@mech.nagoya-u.ac.jp	052-789-4673	052-789-3109
	荒井 孝司	(有)テクノエビー		代表取締役	312-0052	ひたちなか市東石川3128-1管理館23号	arai@techno-ap.com	029-354-8770	029-354-8772
	荒木 邦夫	中央開発(株)	事業推進本部	技師長	160-8612	新宿区西早稲田3-13-5	kunio_araki@ckc-unet.ocn.jp	03-3208-5251	03-3208-3572
	有井 一晃	住重試験検査	エンジニアリング事業部		799-1393	愛媛県東予市今在家1501		0898-65-4868	0898-65-4547
い	飯田 邦利	(株)アトックス	東海営業所	所長	319-1112	那珂郡東海村松白根161-2	kunitoshi_jida@atox.co.jp	029-282-7105	029-282-8026
	生田 文昭	高層炭熱機(株)	電機事業部開発部	次長	254-0013	神奈川県平塚市田村5893	f-kuita@pro.ipnet.or.jp	0463-55-1460	0463-55-8542
	池田 裕二郎	中性子科学センター	中性子施設開発グループ	リーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	ikedai@fnshp.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6074	029-282-6496
	石山 嘉英	日本核燃料開発(株)	第一研究部		311-1313	東茨城郡大洗町成田町2163	ishiyama@nfd.co.jp	029-266-2131	029-266-2589
	伊藤 和臣	化学技術戦略推進機構	戦略推進部	部長研究員	101-0051	東京都千代田区神田神保町1-3-5	ito@jcil.or.jp	03-5282-7270	03-5282-0250
	井上 和子	麗谷大学	理工学部	講師	520-2194	大津市瀬田大江町橋谷1-5	inoue@ins.ryukoku.ac.jp	077-543-7429	077-543-7457
う	内山 昌俊	インターソシオ(株)	技術部	部長	312-0046	ひたちなか市勝田泉町11-3	uchiyama@socio.co.jp	029-276-1630	029-354-0013
え	江畑 謙一	石川島播磨重工業(株)	本部技術開発センター-要素技術開発グループ	課長	190-1297	東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229	shigekazu_ebata@ihi.co.jp	042-568-7249	042-568-7100
お	大城戸 忍	(株)日立製作所	機械研究所第3部	研究員	300-0013	茨城県土浦市神立町502	ohkido@gm.merl.hitachi.co.jp	0294-23-5789	0294-23-6959
	大山 幸夫	中性子科学センター		次長	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	oyama@cens.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6809	029-282-5996
	小木曾 克彦	理学電機	X線研究所回折研究部	部長	196-8666	昭島市松原町3-9-12	oguiso@rigaku.co.jp	042-545-8152	042-546-7090
	小野瀬 正美	茨城県企画部	地域計画課県北地域担当	係長	310-8555	水戸市笠原町978-6	masa-onose@pref.ibaraki.jp	029-301-2725	029-301-2739
	小畑 稔	日本核燃料開発(株)	第一研究部	主研	311-1313	東茨城郡大洗町成田町2163	obata@nfd.co.jp	029-267-9003	029-266-2589
か	加倉井 和久	先端基礎研究センター	スピン-格子相関中性子散乱研究グループ	リーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	kakurai@neutrons.tokai.jaeri.go.jp	029-284-3523	029-282-5939
	加治 芳行	エネルギーシステム研究部	複合環境材料研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	kaji@popsvr.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5386	029-282-5864
	櫻村 隆	(株)シナノテック	開発部	部長	312-0062	ひたちなか市高場327-2		029-285-1777	029-285-1072
	勝田 慎治	(株)ビームトロン		技術顧問	311-4305	東茨城郡常北町上青山298-1		029-240-6005	029-240-6008
	片桐 政樹	先端基礎研究センター	ハルス中性子イメージンググループ	リーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	kata@stsp2a0.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6547	029-282-5927

	蟹江 厚臣	茨城大学	研究科物質工学専攻 友田研究室	博士前期課程1年	316-8511	日立市中成沢町4-12-1	nm1511f@hcs.ibaraki.ac.jp	0294-38-5082	
	神山 崇	高エネルギー加速器研究機構	物質構造科学研究所 中性子散乱施設	教授	305-0801	茨城県つくば市大塚1-1	takashi.kamiyama@kek.jp	5612(階室),5622(実験室)	0298-64-3202
	川村 健久	東京大学物性研究所	附属中性子散乱研究施設		319-1106	那珂郡東海村白方白根2-4		029-282-5782	
	神田 光晴	茨城大学	工学部	院生	316-8511	日立市中成沢町4-12-1	nm0510f@hcs.ibaraki.ac.jp		
き	菊地 賢司	中性子科学センター	核変換利用開発グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	kikuchi@popsvr.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5058	
く	工藤 文夫	三菱重工業(株)	原子力技術部	首席技師	220-8401	横浜市西区みなとみらい3-3-1	kudough@atom.hq.mhi.co.jp	045-224-9250	045-224-9925
	栗田 政則	長岡技術科学大学	機械系	教授	940-2188	新潟県長岡市上富岡町1603-1	kurita@mech.nagaokaut.ac.jp	0258-48-9724	0258-47-9770
	栗本 泰夫	助川電気工業(株)			318-0004	高崎市上手綱3333-23		0293-23-6411	0293-22-2909
	草田 亮	茨城大学	工学部超超性工学研究センター	助教授	316-8511	日立市中成沢町4-12-1	kurumada@mech.ibaraki.ac.jp	0294-38-5038	0294-38-5047
こ	小山 高一	(財)日立地区産業支援センター		常務理事兼センター長	316-0032	日立市幸町2-20-1		0294-25-6121	0294-25-6125
	駒井 彰	(株)マック・サイエンス	筑波営業所		305-0023	つくば市上の壺579-1	komai@macscience.co.jp	0298-57-9012	0298-57-9013
さ	坂佐井 馨	先端基礎研究センター	ハルス中性子イメージンググループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	sakasai@stsp2a0.tokai.jaeri.go.jp	029-282-3519	029-282-5927
	桜井 孝至	住友化学工業(株)	石油化学品研究所 解析情報グループ	研究員	299-0295	千葉県袖ヶ浦市北袖2-1	sakurai2@sc.sumitomo_chem.co.jp	0438-63-1277	0438-63-6754
	佐々木 敏彦	金沢大学	自然科学研究科	助教授	920-1163	金沢市角間町	sasakit@konroku.kanazawa_u.ac.jp	076-264-5477	076-264-6039
	佐藤 達志	(株)ビームトロン		代表取締役	311-4305	東茨城郡常北町上青山298-1	sato@biemtron.com	029-240-6005	029-240-6008
	佐藤 真直	(財)高輝度光科学研究センター	部門産業応用・利用促進グループ	研究員	679-5198	兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1	msato@spring8.or.jp	0791-58-0802 内3507	0791-58-1873
	澤野 成民	(株)リガク	筑波営業所		305-0821	つくば市春日2-33-6	sawano@rigaku.co.jp	0298-52-3911	0298-52-3913
し	茂中 尚登	(財)発電設備技術検査協会	アリンクセンター-IASCCグループ	主査	279-0011	千葉県浦安市美浜1-9-2ビジネスコート新浦安4F	jascc.japeic@pep.ne.jp	047-380-8558	047-380-8556
	嶋原 育子	インターソシオ(株)	技術部	代表取締役	312-0046	ひたちなか市勝田泉町11-3		029-276-1630	029-354-0013
	志水 陽介	茨城大学	工学部物質工学科		316-8511	日立市中成沢町4-12-1			
	下条 豊	先端基礎研究センター	スピン格子相関中性子散乱研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	shiriojyo@kotai3.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6886	029-282-5939
す	杉本 則彦	(株)ひたちなかテクノセンター	研究開発部	部長	312-0005	ひたちなか市新光町3B		029-264-2200	029-264-2203
	杉本 正樹	龍谷大学	理工学部	院生	520-2194	大津市瀬田大江町横谷1-5		077-543-7429	077-543-7457
	鈴木 邦彦	国際原子力総合技術センター			319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4		029-282-5108	029-282-6040
	鈴木 淳市	先端基礎研究センター	ナノセンシング磁気顕微鏡研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	suzuki@neutrons.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6831	029-282-5939

	鈴木 徹世	茨城大学	工学部	助教授	316-8511	茨城県日立市中成沢町4-12-1	tetsuya@ipc.ibaraki.ac.jp		
	鈴木 睦男	(株) ひたちなかテクノセンター			312-0005	ひたちなか市新光町38	sugi@htc.co.jp	029-264-2200	029-264-2203
	ステファン・ハム	茨城大学	工学部超塑性工学研究センター		316-8511	日立市中成沢町4-12-1	stefanus@ipc.ibaraki.ac.jp	0294-38-5244	0294-38-5047
そ	曹山 和彦	中性子科学センター	中性子利用開発グループ	サブリーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	soyama@jrr3fep2.tokai.jaeri.go.jp	029-282-3703	029-282-6496
た	竹原 博	(株) リガク	筑波営業所		305-0821	つくば市春日2-33-6	takehara@rigaku.co.jp	0298-52-3911	0298-52-3913
	田所 幸広	(株) 日立製作所	電力・電機開発研究所	研究員	319-1221	日立市大塚町7-2-1	takahiro_tadokoro@pis.hitachi.co.jp	0294-52-9340	0294-52-9287
	田所 敬之	皇和電機(株)	茨城出張所		316-0022	日立市大沼町3-22-11		0294-35-2621	0294-35-2621
	田中 啓介	名古屋大学	工学研究科	教授	464-8603	名古屋市千種区不老町	k_tanaka@mech.nagoya.u.ac.jp	052-789-4672	052-789-3111
つ	塚田 隆	エネルギーシステム研究部	複合環境材料研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	tsukada@popsvr.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6082	029-282-6122
	土屋 弘行	日立エンジニアリング(株)	本部開発エンジニアリング部	部長	317-8511	日立市幸町3-1-1	h_tsuchiya@psg.hitachinec.co.jp	0294-23-5942	0294-23-6770
と	藤 健太郎	先端基礎研究センター	パルス中性子イメージンググループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	toh@stsp2a0.tokai.jaeri.go.jp	029-282-3519	029-282-5927
	樋根 健治郎	(株) 東芝	原子力開発営業部	東海事務所 長	319-1106	茨城県那珂郡東海村白方17	kenjiro.higashi@toshiba.co.jp	029-282-0382	029-283-3444
	梅野 勉次	(株) 関電工	営業統括本部	取締役副本部長	108-8533	東京都港区4-8-33		03-5476-3607	03-5476-3820
	徳田 玄聖	茨城大学	工学部物質工学科	4年	316-8511	日立市中成沢町4-12-1	t280921@hcs.ibaraki.ac.jp		
	友田 陽	茨城大学	工学部物質工学科	教授	316-8511	茨城県日立市中成沢町4-12-1	tomota@ipc.ibaraki.ac.jp	0294-38-5055	0294-38-5226
	鳥居 周輝	茨城大学	工学部	SVBL	316-8511	茨城県日立市中成沢町4-12-1	tori@ipc.ibaraki.ac.jp	0294-38-5055	0294-38-5264
な	仲田 清智	日本核燃料開発(株)		主幹研究員	311-1313	東京都東大洗町成田町2163	k_nakata@ntd.co.jp	029-267-9003	029-266-2589
	中根 隆雄	茨城大学	工学部物質工学科		316-8511	日立市中成沢町4-12-1			
に	新村 信雄	先端基礎研究センター	中性子構造生物学研究グループ	リーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	nimura@kotai3.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5906	029-282-5939
の	野村 精志	(株) ひたちなかテクノセンター	研究開発部	主管技師長	312-0005	ひたちなか市新光町38		029-264-2200	029-264-2203
は	英 栄夫	徳島大学	工学部	教授	770-8506	徳島市南常三島町2-1	hanabusa@me.tokushima-u.ac.jp	088-656-7577	088-656-9082
	番場 正男	企画室	研究協力推進室		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	m-banba@popsvr.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6363	029-282-6365
ふ	福田 拓司	原子燃料工業(株)	東海事業所 技術開発部		319-1196	那珂郡東海村村松3135-41	fukuda@nfi.co.jp	029-287-8208	029-287-8222
	藤井 保彦	東京大学物性研究所	附属中性子散乱研究施設		319-1195	茨城県那珂郡東海村白方106-1	yfujii@issp.u-tokyo.ac.jp	029-287-8901	029-283-3922
	藤田 浩	中性子科学センター			319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4			

ほ	保坂 栄二	THK (株)	技術開発部		409-3801	山梨県中巨摩郡玉穂町中橋754	094070@thk.co.jp	055-273-7182	055-274-0597
ま	松田 雅彦	先端基礎研究センター	スピン-格子相関中性子散乱研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	matsuda@neutrons.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6830	029-282-5939
	松林 政仁	中性子科学センター	中性子利用開発グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	matsu@jrr3fep2.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6936	029-282-6496
	松本 洋一	日本精工 (株)	基礎技術研究所	主席研究員	251-8501	神奈川県藤沢市鶴沼神明1-5-50	matsumoto-yo@nsk.com	0466-21-3231	
み	菅川 宣明	先端基礎研究センター	極限環境中性子散乱法研究グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	minakawa@kotai3.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5997	029-282-5939
	宮入 睦彦	(株) シナノテック	総務部	代表取締役	312-0062	ひたちなか市高場327-2	aab10620@pop16.odn.ne.jp	029-285-1777	029-285-1072
	三代 達也	(有) アドバンスト・マシン・工房	営業部	部長	319-1231	日立市留町1270-17	miyo@hd-inc.co.jp	0294-53-6006	0294-52-5694
む	尚井 竜二	埼玉工業大学	大学院工学研究科	博士後期課程物質科学工学専攻	369-0203	埼玉県大里郡岡部町菅沢寺1690	q1002v9z@sit.ac.jp	048-585-6826	048-585-6826
	桜木 健	中性子科学センター	加速器グループ		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4			
	村野 佳大	(株) 関電工	エネルギーソリューション部	部長	108-8533	東京都港区4-8-33	murano-yo1@kanden.co.jp	03-5476-3607	03-5476-3820
も	盛合 毅	研究炉部	研究炉利用課		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	mortai@jrr3fep2.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5593	029-282-6763
	森井 幸生	先端基礎研究センター	極限環境中性子散乱法研究グループ	リーダー	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	mori@neutrons.tokai.jaeri.go.jp	029-282-6093	029-282-5939
や	安 藤 毅	(財) 発電設備技術検査協会	アリングセンター-IASCCグループ	グループ長	279-0011	千葉県浦安市美浜1-9-2ビジネスコート新浦安4F	jascc.japelc@pep.ne.jp	047-380-8558	047-380-8556
	安岡 弘志	先端基礎研究センター		センター長	319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4	hiroshi@popsvr.tokai.jaeri.go.jp	029-282-5093	029-282-5927
	安田 良	ホット試験室	ホット試験技術課		319-1195	那珂郡東海村白方白根2-4		029-282-5727	029-282-5293
	山野 直樹	住友原子力工業 (株)	核設計部	部長	130-0026	東京都墨田区両国2-10-14	yamano@sae.co.jp	03-5624-1551	03-5624-1554
	山本 宏	助川電気工業 (株)	営業部第2営業課	副長	318-0004	高萩市上手纏3333-23	h-yamamoto@net-sukegawa.com	0293-23-6411	0293-22-2909
よ	吉田 寿美	日立エンジニアリング (株)			317-8511	日立市幸町3-1-1			
	米澤 利夫	三菱重工業 (株)	技術本部高砂研究所	主管研究員	676-8686	兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1	yonezawa@wn.trdc.mhi.co.jp	078-672-3446	078-672-3339

 外来講師
 原研講師
 原研

合 計	参加人数	93名	(リスト掲載)	93名内訳	企業：40名	大学：21名	公的機関：7名	原研：25名
	他 原研	13名						
	計	106名						

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オンGSTローム	A
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 b=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

粘 度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))
動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表) 仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499W
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹	
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸	
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

中性子回折の産業利用ワークショップ報告書 — 中性子回折による応力測定 —