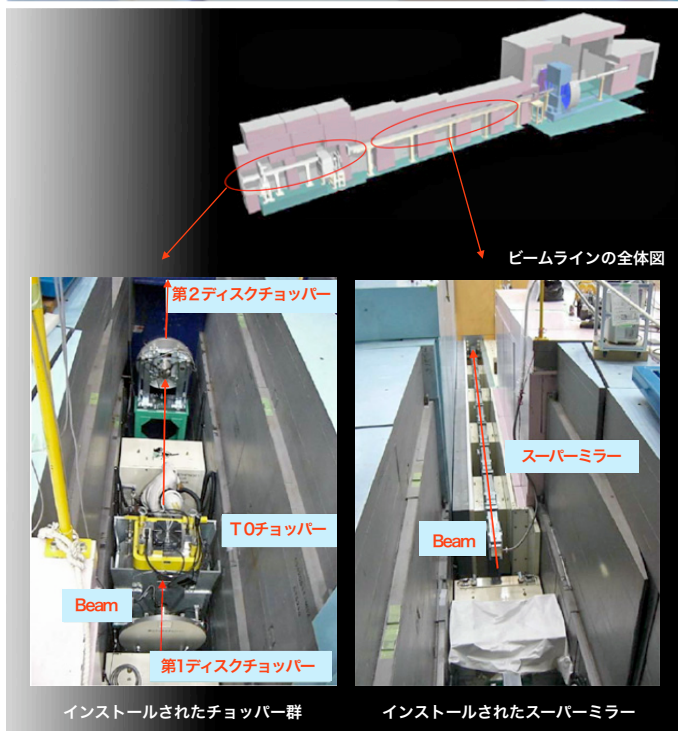




科学研究費補助金「新学術領域研究」
高温高压中性子実験で拓く地球の物質科学

目次

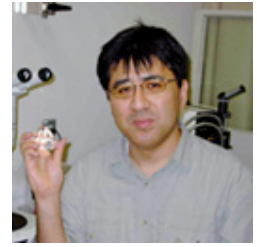
- 巻頭言 永井 隆哉 (北大) 2
- 新学術領域研究「中間審査」報告 八木 健彦 (東大) 3
- ビームライン建設状況報告 東海建設チーム (原研) 4
- 「匠」を使った予備実験報告4 阿部 淳、有馬 寛 (原研) 6
- 中性子カメラ予備実験報告 井上 徹、有馬 寛 (愛媛大・原研) 7
- J-PARCで得られた高压中性子回折データから 小松 一生 (東大) 8
 構造解析が可能に
- 中性子回折実験用の高压発生装置の改良 飯塚 理子 (東大) 9
- キュービックアンビル装置用セル 山田 明寛、川添 貴章 (愛媛大) 11
 開発 (6-6 加圧方式) の中間報告 2
- PLANETでの6-8 式加圧実験に向けた 佐野 亜沙美 (原研) 12
 予備実験の報告
- TiZr合金の製作の報告 奥地 拓生 (岡山大) 13
- 各研究班からの報告
 - ・ 含水鉱物班 永井 隆哉 (北大) 14
 「HFIR原子炉中性子施設での高温中性子散乱実験」
 - ・ マグマ班 三部 賢治 (東大) 15
 「含水マグマと流体の混和不混和現象」
 - ・ 液体班 YAGAFAROV, Oscar (原研) 17
 「高密度化石英ガラスの構造解析」
 - ・ 計算班 飯高 敏晃 (理研) 18
 「世界最小のマグマをスパコンのなかに創る」
- 高压討論会シンポジウム「高压中性子科学」報告 井上 徹 (愛媛大) 19
- 高压中性子集会報告 永井 隆哉 (北大) 19
- IUCr High Pressure Workshop 報告 片山 芳則 (原研) 20
- 受賞関係報告 八木 健彦 (東大) 21
- 研究集会の案内 22
- 編集後記 22



写真の説明 今夏にインストールされたビームライン機器。



巻頭言



北海道大学大学院理学研究院：永井 隆哉

新学術領域研究「高温高圧中性子実験で拓く地球の物質科学」のニューズレターも第4号となりました。本ニューズレターがお手元に届くのは、皆様それぞれ新たな決意を胸に穏やかな新春を迎えられた頃だと思えます。本プロジェクト採択から3年が経過し、5年間の研究期間も折り返し地点を過ぎました。建設中の高温高圧中性子ビームラインPLANETはファーストビーム受入目前です。来冬の便りが届くころにはファーストデータが収集できるよう、今年は本プロジェクトにとっての正念場を迎えます。皆様のより一層のがんばりをご協力をよろしくお願ひいたします。今回の巻頭言では、PLANETを利用した本格的な高温高圧中性子実験の実現を目前にしたこの時期、我々がPLANETで最初にどんなサイエンスを展開していくのかを考えるきっかけになればと、世界の中でのPLANETの特色と期待されている役割について私の感じていることを簡単に紹介したいと思います。

皆様ご存知のように世界にはパルス中性子と高圧を結びつけた研究で先行する施設として、ISIS（英国）やSNS（米国）などがあります。ISISからは高圧中性子用Paris-Edinburghプレスの開発を含め、20年前から現在に至るまで先駆的な研究が数多く報告されています。また、SNSはMLF同等の性能を持つ新世代パルス中性子源で、一足先の2006年から稼働を始めており、SNAPという高圧専用BLでの研究もすでに始まっています。

ところで、これら先行する施設とPLANETとは、ユーザーグループの出身分野が大きく違います。海外の高圧中性子BLは物理・化学出身者が多く、その興味の対象から低温高圧下でのサイエンスが中心に行われてきています。一方PLANETは、地球科学出身者が計画当初より多く係わってきた事情もあって、地球深部の高温高圧下でのサイエンスを当初のターゲットに設定し、海外の先行ビームラインと差別化することで本プロジェクトの特徴と独創性を強調してきました。これは本プロジェクトの採択に向けた一つの戦略でもあったわけですが、海外の研究者とPLANETの話をする、PLANETでの「高温高圧」中性子実験実現への期待はもちろん、マグマ・水の構造や水素のダイナミクスなどサイエンスそのものに対する関心も高く、本プロジェクトの目指している方向が間違っていないことを再認識させられました。

本プロジェクト研究期間内で実際にPLANET利用実験ができるのは、1年少々しかありません。しかしその限られた時間の中で、中性子を利用したことによって初めて見えてくる、含水鉱物・マグマ・水の高温高圧下での興味ある振る舞いを一つでも多く明らかにし、世界に発信することが本プロジェクトに与えられた使命です。これからの半年間、プレスや検出器の設置などPLANET完成に向けた大詰めの作業はもちろん、どのようなサイエンスをどのような優先順位で行っていくのが本プロジェクトの成果をアピールできるかを十分に議論することが重要です。そして、本格的なPLANET利用実験開始後、面白いサイエンスのデータを、できるだけ速やかに発信することができるよう今まで以上に協力してがんばっていききたいものです。今年もどうぞよろしくお願ひいたします。



新学術領域研究「中間審査」報告



領域代表：東京大学物性研究所・八木 健彦

特別推進研究や新学術領域研究など大型予算をもらっての研究では通常、実施期間の中間で研究の進展具合をチェックする「中間審査」が行われる。早いもので平成20年度秋に開始した我々の新学術領域研究も5年間という実施期間の半ばにさしかかり、22年度夏に中間審査を受けた。その様子と結果を簡単にご報告したい。

まず7月はじめには文部科学省から、中間審査の資料提出とヒアリングの期日に関する通知が来て、各班の代表者や東海のビームライン建設チームのメンバーなどに助けをもらいながら、30ページほどからなる資料をまとめた。当初計画と対比しながら、今までにどの程度計画が進捗し、成果があがっているかを分かり易くまとめたものである。本領域研究ではまだビームラインの建設を進めている段階で、目的としている研究成果があがる段階にはなっていないが、ビームライン建設はほぼ予定通りに進行し、実験開始に向けた準備も各研究班で着々と進行している様子がよく分かる資料を何とかまとめることができた。それを元に9月10日に行われるヒアリングの準備を進めたが、文科省で行われるこのようなヒアリングでは、20-30名の審査員を前に15分と厳密に時間を切ったプレゼンテーションと20分におよぶ質疑応答が行われるので、入念な準備が必要となる。永井さんと内海さんに同行してもらったヒアリングでは、予定していた図が出てこないといったハプニングもあったものの、幸い伝えたいことはちゃんと発表でき、質問も好意的なものが多くおおむね評判が良かったようで安堵した。こうしてなんとか、A評価（研究領域の設定目的に照らして、期待通りの進展がみとめられる）を受けることができた。これもひとえに班員各々がやるべき役割をきっちりと果たして計画を順調に進行させ、それぞれの段階で期待される成果をだしてきたおかげである。改めて皆さんの努力と協力に感謝したい。

これで後半の計画も予定通り進められることになったわけで、2011年夏に予定されるPLANETで初となる高圧実験に向け、一層の努力を集中していただければ幸いである。

追記： その後12月10日に文科省から突然、上記の高い中間評価結果を受けて、「計画の一層の進展を促すために研究班への追加配分の要望を受け付けるから、17日までに要望書を提出するように」との連絡が来た。またまた各班の班長たちとあわただしくやりとりし、年度内に執行可能で、計画の予想外の進展に役立つ、など種々の条件を満たす項目を選び出し、見積もりなどの作業を超特急で進めて何とか要望を出し終え、無事交付されることが決定した。今年度はまだビームライン建設段階で、研究班への配分は少ないため、追加配分の方が当初配分よりずっと多いという奇妙な状態になった班もあるが、計画の進展には大きくプラスになると思われる。まだこの先いろいろ予期しないことも起こると思われるが、この研究領域メンバーのチームワークの良さを生かして何とか乗り切り、大きな成果に繋げたいものである。



ビームライン建設状況報告

東海建設チーム



先の6月の報告からの建設の進展状況を報告します。J-PARCも7, 8, 9月のビーム休止期間に入り、建設チームにとっては、柿入れ時となりました。いよいよ、ビームライン光学系をインストールしようとした矢先に、昨年度完成したビームライン遮蔽体の内壁が崩れ落ちるという事象に見舞われました。その問題に早急に対処すべく、今夏はその原因究明と対応に追われ、遮蔽体も私の心も崩れ落ちる寸前まで行きましたが、持ち前の強固な(?)フレームで何とか、持ちこたえることができました。協議の結果、J-PARC/MLF 始まって以来の「遮蔽体全解体、工場持ち帰り再施工、再据付」ということになり、推定湿度90%のMLF内で、毎日汗だくになって解体作業を行っておりました。業者とハードな交渉の結果、もとい業者の紳士的な対応で、幸いにも、無償にて修復をしていただけるということになり、事なきを得ました(業者の方には感謝！)。8月のお盆前には完全復活し(図1)、その後、生じた遅れを取り戻すべく、当初計画していたチョッパー、ミラーの据付工事を急ピッチで進めました。皆様のご協力もあり、9月末までに、ビーム停止期間中に予定していたチョッパー群のインストールおよび試運転、鉄コリメータ、スーパーミラーガイド管の据付、上流四象限スリットの導入、ビーム導入部遮蔽体の据付を無事完了することができました(図2)。

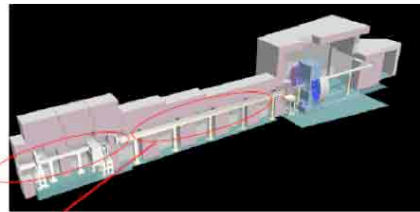
また、上記建設と同時進行で、プレスの詳細設計、検出器架台の設計を進め、困難を極めるプレス退避時の干渉問題もほぼ解決でき、現在製作に入っております。10月以降は、これらの作業を継続するとともに、付帯設備(実験盤の製作、分電盤の製作(製作中)、ユーティリティー配管の製作、インターロックの製作)の建設に当たりました(図1)。また、PLANETの出来とともに高圧実験の成否を握るキャビンに関しても、MLF随一の占有面積が必要となるため、施設側との一進一退の攻防を経て、高圧実験の準備をするのに十分な広さのキャビンの建設許可を得ることができました。2011年の正月明けからいよいよ建設を開始する予定です。

皆さんが、注目している **First Beam** に関してですが、インターロックの自主検査も終わり(図2)、12月末の施設検査を経た後、1月中旬にビームを受け入れる予定です。

来年度の建設予定ですが、いよいよ高圧プレス「圧姫」が完成し、工場でのテスト運転に入ります。良好な結果が得られ次第、来年度のビーム停止期間中(7-9月)に、検出器架台とともにインストールをする予定です。ハードに関する建設もいよいよゴールが見えてきて、これからソフトに関する製作になります。使いやすいビームラインにすべく、皆さんの意見も聞きながら進めていきたいので、ご意見・ご要望のある方は一声、お声をおかけください。



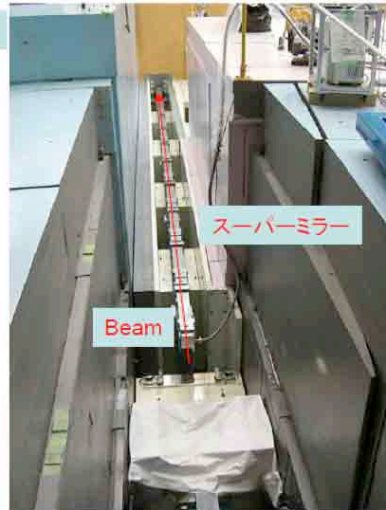
図1. PLANETの現状（左部輸送部遮蔽体上にあるのはチョッパー制御盤）



ビームラインの全体図



インストールされたチョッパー群



インストールされたスーパーミラー



完成したインターロックシステム
(赤色信号はシャッターopenのサイン)

図2. 今夏にインストールされたビームライン機器



「匠」を使った予備実験報告4

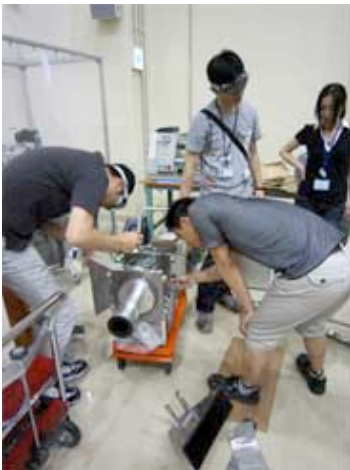
(2010年6月19-22日、11月21-23日、11月30日-12月2日)



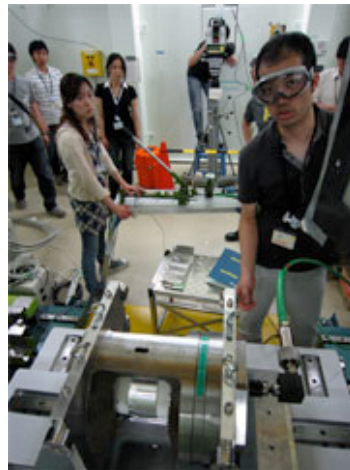
日本原子力研究開発機構：阿部 淳、有馬 寛

J-PARCのBL19工学材料回折装置「匠」で行っているプロジェクト課題研究に関して報告します。本年6月以降の実験では、パームキュービックアンビルセルやパリ・エジンバラプレスを用いた高圧氷の測定、対向型アンビルセルを用いてのハイドレートの測定、2段押しジオメトリーを用いた回折測定、イメージング用中性子カメラの性能評価などを行いました。各実験の詳細については本号の各メンバーからの報告をご覧ください。また9月にはJ-PARC/MLF BL19研究会が開催され、「匠」でのプロジェクト研究の成果が発表されました。高圧課題からは7件の発表があり、これまでの技術開発や測定結果が述べられるとともに今後の研究方針が議論されました。

2010年11月末からはついにISISを超える200kWでの運転が開始されました。世界をリードする成果を打ち立てるべく実験中です。



パリエジンバラプレスに試料を詰める小松さんとそれを見守る服部さん、佐野さん、Wei-Tinさん。



パリエジンバラプレスの位置あわせをする皆さん。



冷凍機を匠のサンプルステージへ載せる佐野さん、小松さん、荒川さん。



中性子用カメラ。



対向型アンビルセルに試料を詰める奥地さんとそれを見守る大野さん、佐々木さん、藤井さん。



今後の方策を議論する皆さん。



中性子カメラ予備実験報告

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター：井上 徹

日本原子力研究開発機構：有馬 寛



2010年6月25日にJ-PARCパルス中性子実験施設の匠ビームラインにおいて、(株)東芝の協力の下、中性子カメラ撮影予備実験を行いました。この予備実験により、パルス中性子を用いて数十秒程度で含水量の異なる試料のコントラスト像が得られることが明らかとなり、また、パルスの特性を生かした、時間分解(すなわちエネルギー分解)した像が得られることも明らかになりました。また、今回の装置は中性子反応体としてポロンを用いており、これにより最高10 μm 程度の分解能が可能であることも明らかになりました。

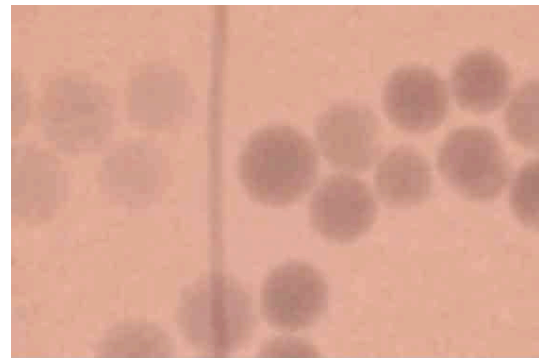
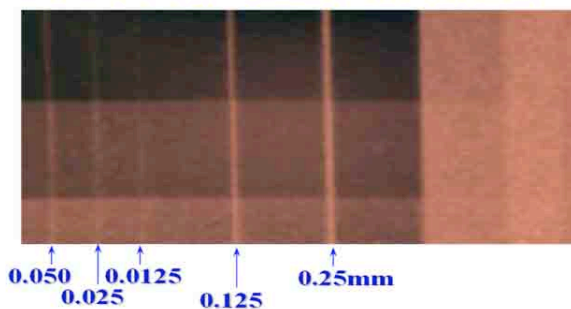
来年度に向けて、この中性子カメラの導入を我々ビームライン”PLANET”に計画しており、このカメラを用いて、高温高压下での含水マグマの混和不混和現象を明らかにし、低圧下での不混和マグマがどの温度圧力条件下で混和マグマに転じるかを明らかにする予定です。



(左図) 中性子カメラとして今回使用した4インチ中性子カラー-I.I. (I.I.:イメージインテンシファイア)。

(右図) ビームラインへの装置の設置。

ブランキング25~39msec : 冷中性子領域



(左図) アクリル樹脂(水素元素含有)ステップのコントラスト像。空間分解能として0.0125 mmの間隔が確認できる。また、これはブランキングをかけた25~39msec(冷中性子領域)のイメージング像である。

(右図) シリカゲル(左:ほぼ無水、右:含水)の中性子イメージング像。含水量によるコントラストの違いが明瞭に見られる。

(中性子カラー-I.I.に関連する参考論文)

- 1) K.Nittoh, C.Konagai, T.Noji, K.Miyabe : Nucl. Instr. And Meth. A 605, (2009), pp.107-110
- 2) 日塔 光一 : 東芝レビュー, 64, 7, (2009), pp.70-71
- 3) 日塔 光一 : 放射線, 36, 4, (2010), pp.195-204



J-PARCで得られた高圧中性子回折データから 構造解析が可能に

東京大学大学院理学系研究科：小松 一生



先の東海チームの報告にあるように、J-PARC/匠&NOVAでの高圧実験も次第に軌道に乗ってきました。限られた時間で意味のある結果を出すべく、メンバーで毎回知恵を絞っているおかげで、ゆっくりではありますが確実に一歩ずつ進んでいる実感があります。さて、徐々にデータが得られてくると、今度はそれをどう料理するかということが問題になります。中性子回折をやる以上は、X線ではわからない軽元素や同位体・隣接元素の構造情報を得たいものです。それらの構造情報を得るためには散乱強度の補正 — 特に高圧セルによる吸収補正 — が不可欠になります。そこで、これまで各種材料の吸収係数の測定（地味！）や光路長を計算して補正する方法を検討してきました。今のところ、ブラッグ反射だけを問題にする結晶構造解析には目処が立ったところです（図1）。

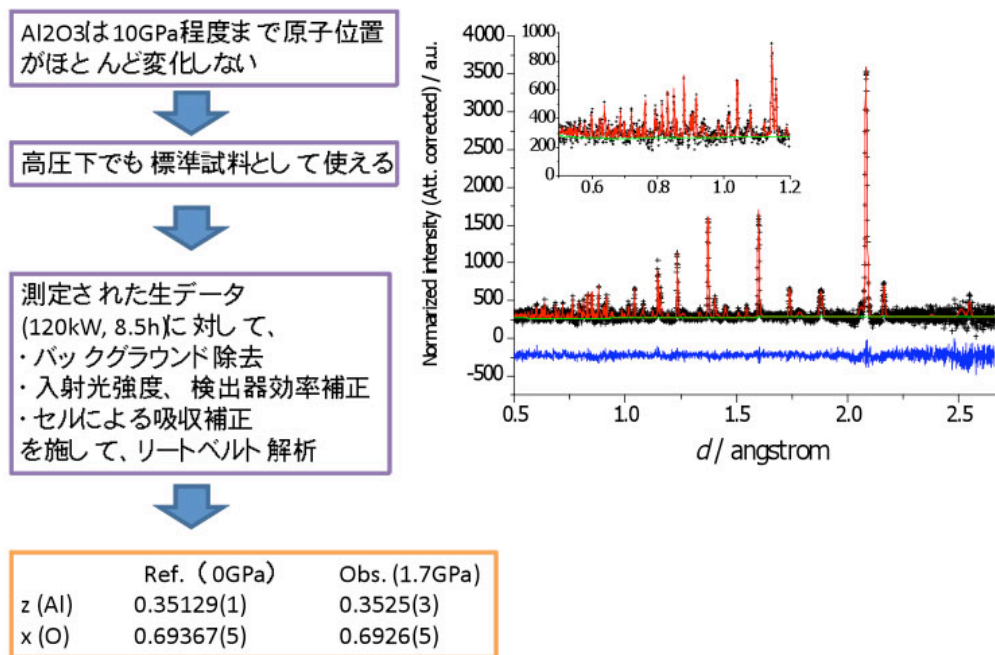


図1. 1.7GPaにおけるAl₂O₃の構造解析例。解析された原子座標は参照値と4σ以内で一致した。

ところで、“ブラッグ反射だけを問題にする”とわざわざことわったのは、“バックグラウンドを捨てている”という後ろめたい気持ちがあるからです。これは、試料のブラッグ反射については試料から来ていることが明々白々なわけで補正のしようもありますが、バックグラウンドについてはどこからやってきたのかわからないので、補正が難しいという背景があります。なにかうねうねしたバックグラウンドこそ大事な情報が隠れているはずで、今後、液体やガラスの構造解析、結晶中の無秩序構造の解析(Pair Distribution Function: PDF解析)には、より洗練されたデータ補正を考える必要があります。バックグラウンドを減らす努力と解析方法の検討はまだまだこれからです。皆様のご指導、ご鞭撻をお願いします。



中性子回折実験用の高圧発生装置の改良

東京大学理学系研究科博士課程2年：飯塚 理子



現在、博士課程の研究テーマとしてParis-Edinburghセル（以下P-Eセル）を使った実験技術の改良を進めています。P-Eセルは国内ではあまり馴染みのない対向アンビル型の高圧装置ですが、海外の中性子実験施設では広く使われてきており、装置・技術開発、サイエンス的新発見ともに数多くの成果が報告されています。このP-Eセルを用いた高圧下での中性子回折実験技術を日本でも確立し、さらに発展させるために、以下のポイントにしばり改良を進めています。（図1参照）。

(1) 回折強度を向上させるために、初期試料体積は減らすことなく、開口角を広げ、さらにガスケットやアンビルからの吸収を最小限に抑えるようなセルデザインの確立。

(2) P-Eセルでは困難であった迅速で正確な圧力決定を行うために、中性子回折測定と同時のルビー蛍光測定を可能にする光学窓付きアンビルの開発。

今までに得られた結果のいくつかを紹介させていただきます。

先月11月下旬に、J-PARCのビームラインBL19『匠』で初めて中性子回折の強度測定を行いました（図2）。匠の検出器バンク($\pm 15^\circ$)に入る中性子散乱の空間分布を測定したところ、斜面の角度が 7° の従来型アンビルでは $\pm 5^\circ$ 程度であるのに対して、斜面が 15° の角度を持つ私のアンビルでは $\pm 12^\circ$ 以上の広い範囲のシグナルが得られることが分かりました。吸収補正や詳細な解析はまだこれからですが、同じ初期試料体積($\sim 50 \text{ mm}^3$)をもつダブルトロイダルアンビルでPbを試料として比較した場合に、シグナル強度が有意に大きいことも分かりました。

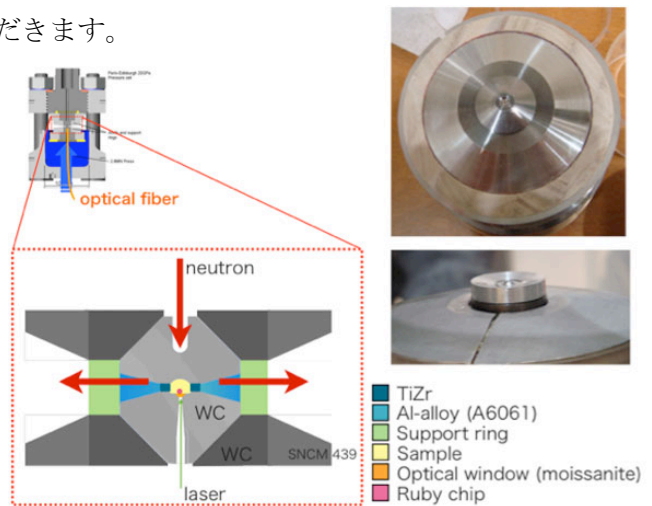


図1. 改良したアンビルセルの断面図および写真

これには、ガスケットに中性子の吸収のより少ない超々ジュラルミンを用いたことも寄与していると考えられます。本研究の初期には、先行研究に倣って同心円状の溝を持つトロイダル型のアンビルをデザインしましたが、溝部分への応力集中による破損が続いたことを考慮して、現在は溝無しで先端径 $\phi 8$ 、キュレット中心に彫り込んだ凹みの径が $\phi 4$ のアンビルにさらなる改良を加えています。このアンビルを用いてすでに13 GPaまでの圧力発生を確認しており（図4；Non-toroidal $\phi 8\text{-}4$ アンビル）、これはダブルトロイダルを持つWCアンビルで到達できる圧力と同程度です。

また、WCアンビルにモアッサナイト（SiC単結晶）の光学窓を埋め込み、試料室内のルビーにレーザー光を照射して、出てくる蛍光を測定できる小型の圧力測定システムを設計・製作しました（図3）。現在までのところ、BiやNaClなどを圧力マーカーとして、電気抵抗やX線との同時測定により試料室内の圧力分布も見ながら、ルビー蛍光測定用のアンビルで10 GPaの圧力測定に成功しています。図4にまとめたように、セル構成の違いによる圧力発生効率の変化などの様子も明らかになりつつあります。将来的には、水素結合化合物の高圧下での構造変化のデータ解析ができるよう、高圧下での静水圧性についても議論していかなければなりません。より静水圧性の高い圧力環境での高圧下中性子回折実験を目指し、かつ誰で

もが使いやすい仕様にするためには、さらなるセルアセンブリの工夫が必要です。

アンビルやガスケットの形状や構成の最適化しようと圧力発生テストを繰り返す中で、私自身にとって数々の発見がありました。1年前、まだ全く使い方も知らなかった旋盤を初めて回した時から、最近でもブローアウトを恐れながら加圧するときまで、ヒヤヒヤすることは多々ありますが、毎回の実験で新たに得られる結果を次へとつなげることで、少しずつでも成果がでてきたことを実感しています。今後、来夏以降の実際の高圧中性子回折実験に向けて、日々試行錯誤しながら精進していきたいと思います。最後になりましたが、日頃のアドバイスとこのたびの執筆依頼をくださった皆様に感謝いたします。



図2. 匠ビームラインでの実験風景

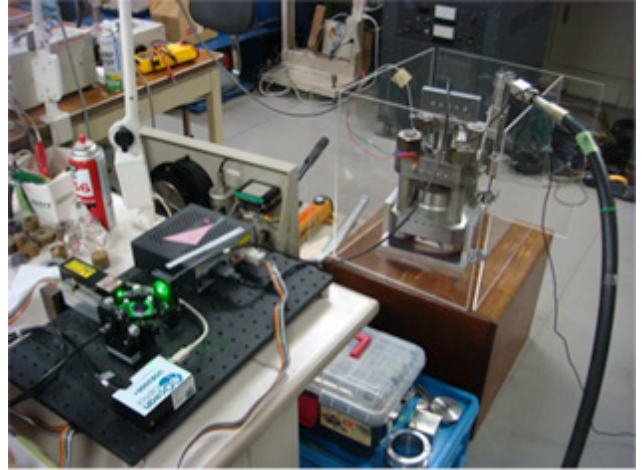


図3. 物性研でのルビー蛍光測定の様子

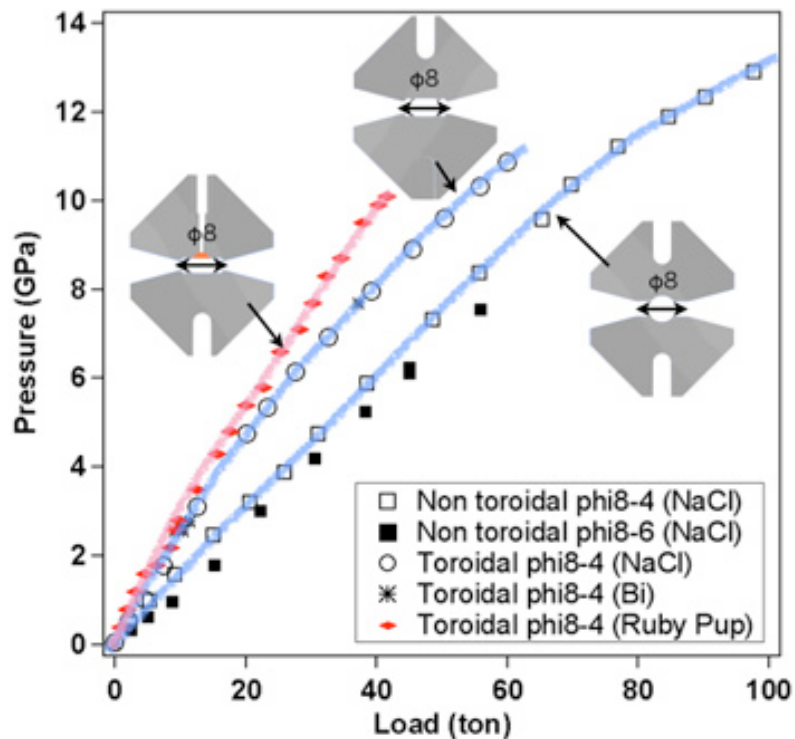
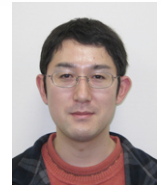


図4. セル構成の違いによる達成圧力と荷重の関係



キュービックアンビル装置用セル開発 (6-6加圧方式) の中間報告 2



愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター： 山田 明寛、 川添 貴章

私たちはこれまでに引き続き、6-6型加圧方式の中性子回折実験への応用に向けた予備的な実験を行っています。これまでも本ニュースレターを通じて紹介させて頂きました通り、2011年度中にJ-PARCの高圧ビームライン(PLANET)へ導入される大型の六軸駆動型高圧発生装置を用いた高圧実験にあたって、本加圧方式は有力なツールの一つです。高圧中性子回折実験において高い精度でデータを得るためには、大容量の試料を確保する事が非常に重要です。このため私たちはこの加圧方式を用いて、圧力下でより多くの試料を確保するための試験的な実験を行っています。これまでのところ、従来の底面18mmのタングステンカーバイド製超合金(以下、アンビル)を用いて約8GPaまでの圧力発生を確保しつつ、立方体の圧力伝達媒体を一辺12mmにまでサイズを拡大することに成功しています(図1 赤線、アンビル先端サイズ一辺7mmを使用)。実際には、試料はこの圧力伝達媒体中に設置されますが、この圧力伝達媒体のサイズ拡大は試料サイズの拡大に直接つながります。しかし、図1を見て頂いてわかるように、これまでの底面18mmのアンビルを用いた実験では、2.5MNを超える加圧を行う事ができていません。これは私たちの予備的な実験から得られた経験的な加圧限界で、この荷重付近でもってアンビルの破壊が生じてしまうことが原因です。このような点から、最近更にアンビルのサイズを底面26mmに拡大したものを導入しました(図2)。これによって高荷重下でアンビル底面にかかる負担(圧力)を軽減し、より高荷重への加圧が可能になると期待されます。また、これに伴いアンビル先端サイズは10mmへと拡大され、更なる試料容積の増加が可能になります。今後はこの大型のアンビルを用いた圧力発生実験を行い、高圧中性子回折実験での実用性を確立して行く予定です。

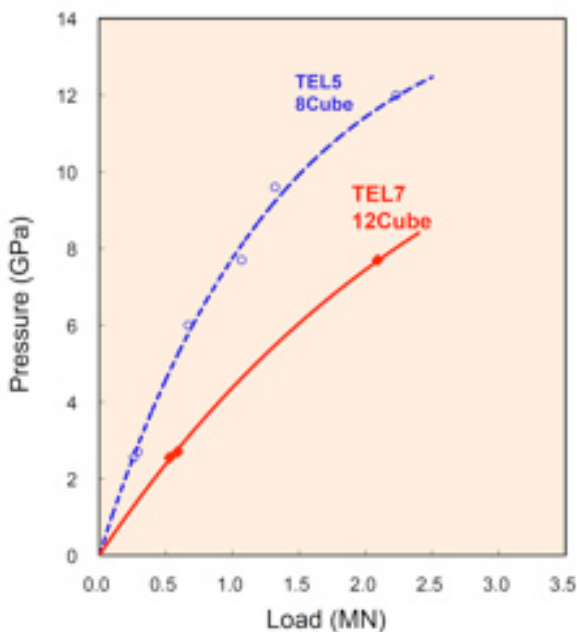


図1. 底面18mmアンビルを用いた圧力発生実験結果。

青: アンビル先端(TEL)5mmで一辺8mmの圧力伝達媒体を加圧した結果。

赤: TEL7mmで一辺12mmの圧力伝達媒体を加圧した結果。

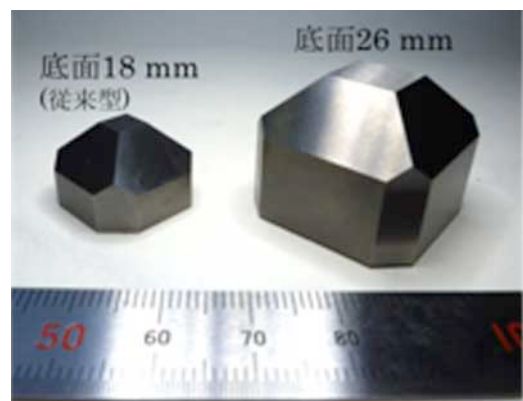


図2. 高圧中性子回折実験に用いられる予定のアンビル。従来のもの(左)と今回導入された大型のアンビル(右)。



PLANETでの6-8式加圧実験に向けた予備実験の報告



日本原子力研究開発機構：佐野 亜沙美

PLANETにインストールされる6軸プレスでは、当面は10 GPa程度での中性子回折実験を目指し6つの2段目アンビルを用いた6-6加圧方式が主流となる予定で、現在セルの最適化が進められているところです。しかし6軸プレスは1軸500トン(DIAプレス換算で1500トン)の高荷重をかけられるプレスですから、8つの2段目アンビルを用いた6-8加圧方式を使えば、より高い圧力を狙うことが可能です。

6-8加圧方式は既に放射光施設では多くの実績があり、その発生圧力はもうすぐ100 GPaに到達しそうな勢いです。しかし放射光実験と中性子実験ではジオメトリや必要な試料サイズに違いがあります。放射光実験では、輝度が高く細いビームが使えるため、アンビルの隙間を通してX線を照射し、ある1点に固定した検出器で測定することが可能です。一方、フラックスの少ない中性子実験では、水平方向 $2\theta=90^\circ \pm 11^\circ$ 、垂直方向 $\pm 35^\circ$ に並べた検出器で見込めるところは全て、アンビルを透過してくる散乱も大事に使って開口角を稼ぐ必要があります。そのため透過率の高い焼結ダイヤモンド製のアンビルを2段目に用いることを考えています。今回はその2段目アンビルとして有望なSiCバインダーの焼結ダイヤモンド素材について、圧力発生テストを行いました。

用いたアンビル素材は新たに手に入れたDiamond Innovation社製のVersimaxです。放射光実験で多く用いられている焼結ダイヤモンドでは、ダイヤモンドの粒子同士をくっつける糊の役割を果たすバインダーにCoが使われていますが、VersimaxはバインダーにSiCを用いていることから、中性子透過率と放射化の問題の改善が期待されます。またSiCバインダーのアンビルは以前からありましたが、Versimaxは同じセラミックバインダーでありながら放電加工が可能であるという特徴があり、加工の際のハードルも下がります。

実験は高エネルギー加速器研究機構、AR内のNE7Aビームラインにて行いました。アンビルのパフォーマンスを確認するためにアンビル切り欠きサイズ(TEL=1.5 mm)、及びガスケットサイズは先行研究と揃えました。異なるガスケットサイズを試し、300 tonで30 GPaおよび275 tonで34 GPaの圧力発生を確認しました。これはこれまで使用されているアンビルと比較して遜色ない結果です。もちろんTEL 1.5 mmでは中性子実験には試料サイズが小さく、今後試料容積を稼ぐためのセル開発も進める必要がありますが、より大きな母材が手に入るのでもこちら期待できます。並行してJ-PARCの匠で、HIP合成のSiC焼結ダイヤモンドを用いたモデルセル(TEL=3.5 mm)を用いた中性子散乱実験も行っており、アンビル、圧力媒体に囲まれた試料から回折パターンが取得できることを確認しました(図2)。上部マントルといわず、マントル遷移層、下部マントルと、地球のより深部の条件をPLANETで再現するのも夢ではないと思っています。

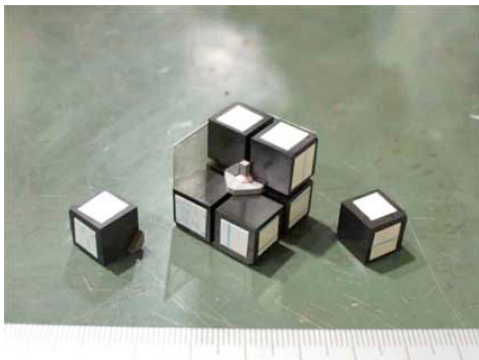


図1. 加圧用セル。8個のキューブ状の焼結ダイヤモンド製アンビルの中に圧力媒体があり、その中に試料がある。

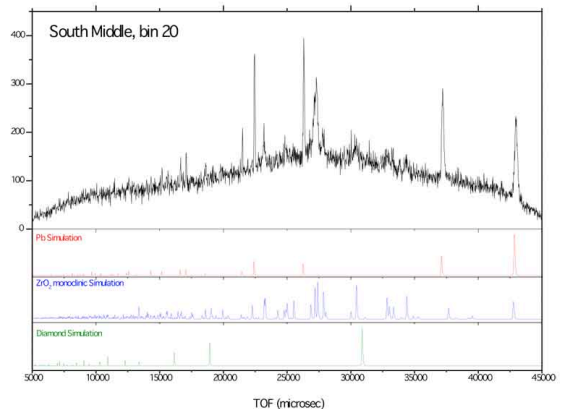


図2. 匠で得た回折パターンと、試料(Pb)、圧力媒体(ZrO₂)、ダイヤモンドのシミュレーションパターン。



TiZr合金の製作の報告



岡山大学地球物質科学研究センター：奥地 拓生

高圧中性子回折実験をJ-PARCにおいて定常的に行うことができるようにするために、解決すべき技術的課題のひとつに、国内では入手が困難であった材料の製作があります。TiZr合金またはnull-alloyはそのなかでも特に重要な材料です。この合金は、中性子の干渉性散乱断面積が負の符号を持つチタンと、正の符号を持つジルコニウムを、互いの値が完全に打ち消しあう組成で混合してつくります。理想的な組成はチタンが52.5 wt.%、ジルコニウムが47.5 wt.%です。この値は通常の金属材料と異なり、その機械的性質を向上させるために決められたものではないのですが、高温で融解して得た合金を急冷することで、金属材料としては相当に高い引張強度(800MPa程度以上)を持たせることができます。若干の吸収はあるものの、中性子に対してほぼ透明であり、しかも高い強度を持つTiZr合金は、中性子を使った高圧実験にはまさに欠かせない素材です。高圧中性子散乱実験が活発に行われているISISおよびSNSにおいては、既にこの材料の製作が実現されており、それが日々の実験で活躍しています。

この材料の国産化を実現するべく、東京大学物性研究所の上床美也先生、物質・材料研究機構の松本武彦先生と相談しながら、これまでの2年間に、3回にわたって試作を行ってきました。日本で多量に製作することが全く初めての合金ということで、毎回ごとに溶解する合金の重量を増やししながら、作業手順の比較検討を行い、また得られた材料の強度や微細組織を分析して、知識を蓄積しました。またパリエジンバラプレスのガスケットなどへの応用の結果から、硬すぎて割れる、内部に空隙がある、鍛造時の表面酸化でできた亀裂が内部に入りこむなど、多数の問題点を報告していただきました。

本年度に行った3回目の製作では、これらの問題をすべて解決すべく、工程を大きく改良しました。まず本年度の夏に原料の溶解を行い、粗い整形(粗鍛造)を経て、純度の高いビレット(太い棒)を得ました(写真)。このあとビレットを熱し、叩きながら大きく伸ばすことで、金属内部の空隙をつぶし、結晶を微細化させて強度を高めていきます。TiZr合金を損なわずに細くする(高い鍛造比を実現する)ことが特に難しいことは、これまでの試作の結果からわかっています。今回の鍛造においても、工程の改良にもかかわらず、途中で材料の酸化が進んだり、ひびが入るなどの問題が発生しました。そのために鍛造工程には時間がかかりましたが、12月までに、太さを12~22mm程度にまで細くした、使いやすいサイズの丸棒を得ることができました。この丸棒はすでにパリエジンバラプレスや対向アンビルセルのガスケットに加工されつつあり、実際の使用による評価を待つ状況です。また私が行っている小型対向アンビルを使った中性子回折実験においては、これまでは深刻だったガスケットが裂ける問題が、最新の素材では大きく軽減しており、鍛造の効果を実感しています。今後また課題は出てくると思いますが、前進はしているようです。



80kgのTiZr合金ビレット。

直径は約90mmで、長さは2本の合計が約1500mm。

これを鍛造して細く絞ることで、材料の強度が大きく増加する。



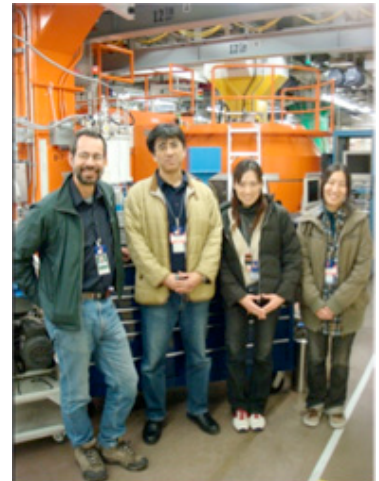
含水鉱物班

HFIR原子炉中性子施設での高温中性子散乱実験

北海道大学大学院理学研究院：永井 隆哉



HFIR (High Flux Isotope Reactor) は、米国テネシー州オークリッジ国立研究所内にある出力85MW (JRR-3は20MW)の研究用原子炉で、中性子散乱実験・カリフォルニウム252など超ウラン元素を含む同位体の生成・中性子線照射実験という主に3つの用途で使用されています。今回は2010年11月28日から12月3日まで、佐野(JAEA)・飯塚(東大D2)と私の3人でHFIRのHB-2Cビームチューブに設置された広角粉末回折装置 (WAND: Wide・Angle Neutron Diffractometr) を使った高温中性子散乱実験を行ってきましたので紹介したいと思います。



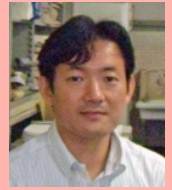
研究課題は、本新学術領域研究の含水鉱物班の大きなテーマの一つである「含水鉱物中の水素の高温高圧下でのダイナミカルな挙動の解明」に対し、 $Mg(OD)_2$ と $Ca(OD)_2$ の脱水温度直下での粉末中性子回折データを収集し、Dの原子変位パラメーターに注目した構造精密化からアプローチを試みようというものです。

高圧下での実験はPLANETの完成を待つとして、今回は真空中での実験です。必要な温度は550~650 K程度までとそれほど高温でもないということで、クライオスタットの温度調節用ヒーターを使って試料の加熱を行いました。事情を知らない人には、低温用のクライオスタットで、実は高温実験をやっているという奇妙な実験に見えたかもしれません。試料は、9mmφ×6cmのV管にほぼ一杯(約2g)です。入射中性子は、Ge(113)のモノクロメーターを使った1.48Åの単色光を使い、検出器は、 $15^\circ < 2\theta < 135^\circ$ 程度をカバーする湾曲型の 3He -PSDが使われています。



十分な量の試料を準備したということと、中性子強度がJRR-3の約4倍ということもあって、相の同定や格子定数の精密化だけであれば測定時間は数分で十分でした。温度を変化させてどんどんデータをとる、カイネティクス等の研究に強い装置だと思います。ただし分解能は、多くの回折線が観測される対称性の低い結晶の精密構造解析には少々不満かもしれません。実験結果の詳細については現在解析中で、近いうちにご報告したいと思います。

WANDは、JAEAとの間の日米協力プログラムによって建設・運営が行われている装置です。装置責任者はJamie Fernandez-Baca博士ですが、今回は休暇中ということでBryan C. Chakoumakos博士が実験のサポートをしてくださいました。サポート体制は素晴らしく、我々が希望する実験条件をBryan博士に提示すると、Bryan博士は5人ほどの技官の方たちと相談し、我々はV管に試料を充填するだけで、クライオスタットの準備、設置、立ち上げなどすべてを技官の方たちが行ってくれて、我々は希望の温度にあげてデータを収集するだけでした。途中、加熱ヒーターにトラブルがあった時も迅速に対応してくれました。PLANETで計画している高温高圧実験は特殊ですし、WANDと同じような状況を期待するのは難しいかもしれませんが、PLANETの運用を始めた後、どのように運営していくか、頭の痛い問題として再認識しました。



地球の大気や海洋には水が存在しますが、地球内部にも水が存在することが知られています。日本列島の様な沈み込み帯では、沈み込む海洋プレートが海水等と反応して含水鉱物が作られ、このような含水鉱物中の水がプレートの沈み込みに伴って地球内部に運ばれています。プレートは沈み込むにつれて温度と圧力が上昇するため、含水鉱物の脱水分解反応が起こり、マントルに水が放出されます。このような地球内部の水が、沈み込み帯の地震や火山と密接な関係があることが知られています。そこで、地球内部の水の性質を調べるのが重要です。

マントルに水が存在すると、温度が高くて比較的圧力が低い条件の場合、岩石が融解したシリケートマグマと水に富む流体（以下、フルイドと呼びます）の2種類の流体が存在することが可能です（図1）。条件がより高圧の場合は、シリケートマグマに水が多く溶け込むようになり、それと同時にフルイド中にもシリケート成分が溶け込み、これら2種類の流体の性質は似てきます。そしてある条件に達するとついには2つの相は完全に混ざり合った超臨界流体となります。この条件を第2臨界端点（あるいは上部臨界端点）と呼びます（図1）。

我々はこれまでスプリングエイトの放射光を用いた高温高圧ラジオグラフィー法により、高温高圧下のシリケートマグマとフルイドをリアルタイムで直接観察し、地球内部を構成する岩石の第2臨界端点を決めてきました（図2）。これまでのところ、地球の上部マントルを構成するペリドタイトに水が存在する場合、深さおよそ120kmのところに第2臨界端点があり、それより深いところでは水とマグマの区別の無い超臨界流体となることがわかってきました（Mibe et al., *J. Geophys. Res.*, 2007）。しかしながら図2の通り、エックス線を用いたラジオグラフィーの画質はお世辞にも素晴らしいとは言えず、そのために我々の結果を信じる人はあまりいません。

マグマとフルイドの臨界現象を観察するもう1つの方法としては、ダイヤモンドアンビルセルを用いて、高温高圧下のサンプルを顕微鏡下で直接観察する方法があります（図3）。ここでは温度圧力条件が図1の臨界曲線にピッタリ一致しているため、シリケートメルトとフルイドのさかい目が消滅し、臨界現象を完全に観察することが可能です。しかしこの装置は最高温度が約1000°Cに限られるため、マントルのペリドタイトの臨界現象を観察するには少し足りません。一方、スプリングエイトでは高温は出せますが、残念ながらエックス線ラジオグラフィーではこのような臨界現象の観察はできませんでした。

現在皆様方のご尽力で着々と整備が進みつつある中性子ビームラインでは、中性子を用いたラジオグラフィーを行う環境が整えられる予定です。中性子ラジオグラフィーはサンプル中の水の量に敏感であるため、エックス線ラジオグラフィーよりも鮮明な画像が得られることが期待されています。これにより、我々の研究成果が自分自身も含めてより多くの人々に信じられるものになることが期待されます。

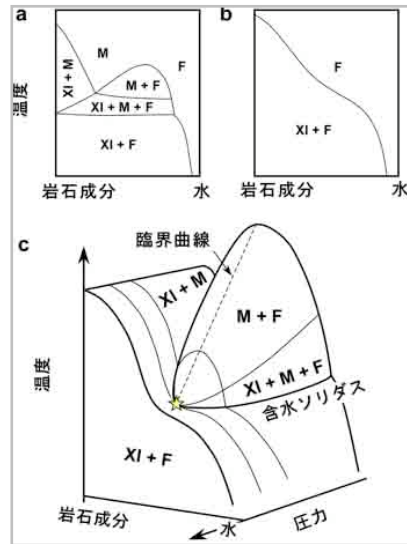


図1. 高温高圧下における水-岩石系の相平衡図。XI:結晶、M:シリケイトメルト(岩石が融解したマグマ)、F:フルイド。a低圧ではシリケイトメルトとフルイドが安定に共存する。b高圧になるとシリケイトメルトからフルイドへと温度により連続的に変化する。c星印が第2臨界端点。星印より高圧ではマグマとフルイドの区別は無。



図2. 圧力2.4GPa、温度1180°Cで共存するシリケイトメルトとフルイド。スプリングエイトのエクス線ラジオグラフィによる観察。

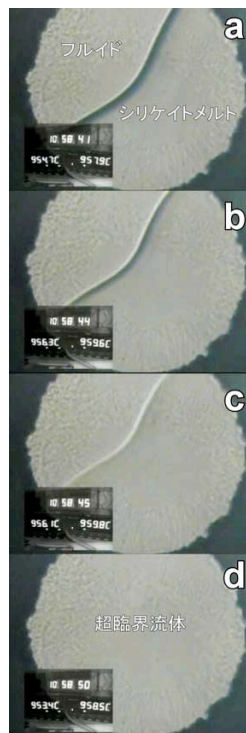


図3. パセッタイプ外熱式ダイヤモンドアンビルセルによるシリケイトメルトとフルイドの臨界現象の直接観察。aからdに向かって温度・圧力ともに上昇。シリケイトメルトとフルイドのさかい目が消滅し、超臨界流体となる。温度約950°C、圧力約1.3GPa。



In the nearest future it will be possible to complement high pressure x-ray measurements at synchrotrons with neutron diffraction study at J-PARC. Analyzing both experimental data in combination may have a synergistic effect. One possible method is to use the Reverse Monte Carlo (RMC) algorithm to derive structures of disordered materials from both diffraction data (O. Gereben et. al., J. Optoelect. Adv. Mater. 9, 3021 (2007)). In order to gain experience we analyze previously measured X-ray and neutron diffraction data on densified silica glass SiO₂ (Y. Inamura et. al., Spring-8 User Exp. Rep. N0259(2001A) P.47., Y. Inamura et. al., J. Non-Cryst. Solids 293-295, 389 (2001)).

High pressure study of this archetypal glass, formed by SiO₄ tetrahedrons with network structure, is still challenging. One of the main issues is understanding of permanent densification mechanism (at $p > 10$ GPa at room temperature). It is known that densification is occurred mostly with modification in the intermediate range order rather than in short-range order. The fact that heating induces the structural change in the intermediate range order suggests that a thermally activated process such as rebonding (breaking of the original bonds and forming of new ones) should accompany the changes.

In order to verify topological changes by analyzing structures directly, we used RMC simulation to build 3D structural models of normal and densified glass. RMC derived a set of coordinates of the 6000 atoms of the configurations that are in good agreement with the experimental data.

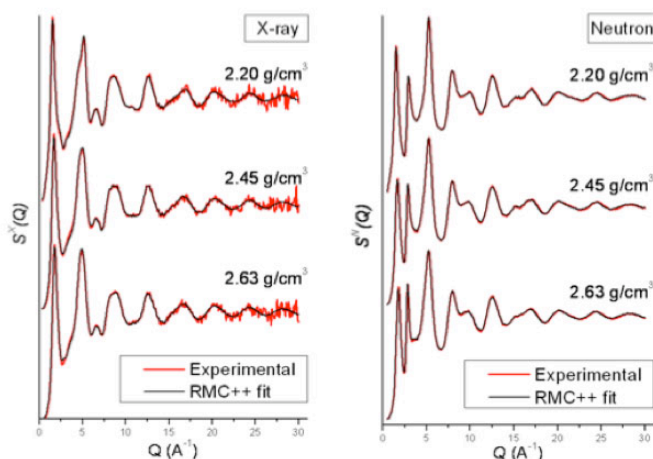


Figure 1. Structure factors: experimental and model

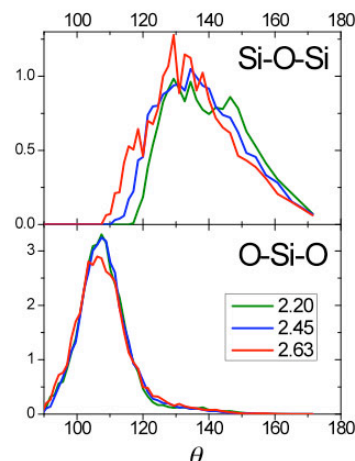


Figure 2. Bond angles distributions

RMC model accurately reproduces the experimental data (Fig.1) and gives reasonable bond angle distributions (Fig.2). The O-Si-O angle distributions peak around 109°, only a slight broadening is seen in the densified glass. The intertetrahedral Si-O-Si angle distribution in the densified silica glass slightly shifts to lower values. Overall not much difference is seen in the other bond angles distributions. As for network topology study, RMC modeling should be done carefully. In usual way denser model is created by compacting of normal one. But in this case it is impossible to model rebonding process, since due to coordination number constraints RMC cannot change the connectivity pattern much. Therefore proper model of densified silica glass should be started from different (independent) initial configurations. To provide better understanding of densification mechanism further analysis (e.g. void space distribution) is in progress.



マグマは地球深部の高温（1000K以上）高圧下で融けて液体となった鉱物で、岩石成分と水や二酸化炭素等の揮発成分からできています。マグマは地殻中でマグマ溜りに蓄積し、火山噴火を起こして地表に出れば溶岩流（図1）とガスとなり、冷えて固まれば火成岩となります。また、原始地球の表面は高温のマグマで被われていたとも考えられています。マグマには、温度一定のまま圧力を上げると粘性が下がる、水分子を含むと融点や粘性が下がるなどの特異な性質がありますが、その詳細は未だに謎です。マグマの構造と性質を明らかにし地球深部でのマグマのダイナミックな動きを理解することは、火山災害を防ぎ、地球形成史を理解するためにも重要な課題です。これまでに多くの地学的研究が行われてきましたが、本新学術領域ではマグマ班がJ-PARCでの次世代中性子線源を用いた高温高圧中性子回折という実験的研究によりこの謎に挑戦しています。私たち計算班は、スパコンを使った第一原理分子動力学計算による理論的研究という方向から取り組んでいます。原子の運動を計算して、拡散、粘性、熱伝導、イオン伝導、分光スペクトルなどの物性や動的構造を予測するのです。マグマの計算の難しさは、高温高圧での原子運動を長時間にわたって計算する必要があること、原子の数を増やすと急激に計算時間が増えることです。マグマはいろいろな鉱物成分が混ざった複雑な液体ですので化学組成の違いによりさまざまな種類が存在しますが、今回は簡単な化学組成 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ を持つ曹長石の最小結晶（26原子）を加熱して世界最小（？）のマグマを創ることに成功しました（図2）。これによりマグマの短距離構造、さらには圧力や水分子を加えたときの短距離構造の変化を研究できるようになりました。短距離構造とは、ある原子の周囲に何個の原子がどのように配置しているかという情報です。粘性や拡散の評価にはさらに大きな結晶を対象とする大規模計算が必要ですので、次世代スパコンを駆使する高速計算法（オーダーN法）の開発も行っています。今後、マグマ班の中性子回折実験と計算班の第一原理分子動力学計算との連携によりマグマ中の水の役割についての新しい知見がもたらされることが期待されます。



図1. 2003年5月3日キラウエア山で観測された溶岩。
<http://hvo.wr.usgs.gov/kilauea/update/archive/2003/May/main.html>

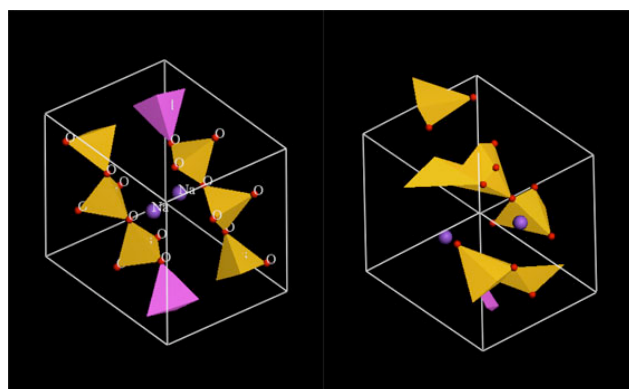


図2. 左図は曹長石の最小結晶(圧力0GPa、温度300K)。黄色の正四面体は SiO_4 構造を、ピンクの正四面体は AlO_4 構造を表す。右図は曹長石のマグマの瞬間図(圧力0GPa、温度1500K)。 <http://www.iitaka.org/~neutron/theory.html>



高圧討論会シンポジウム「高圧中性子科学」報告

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター：井上 徹

2010年10月20日(水)～22日(金)にかけて仙台市戦災復興記念館において第51回高圧討論会が開催され、第1日目と2日目にシンポジウム「高圧中性子科学」を開催しました。本新学術領域研究及び兄弟分の学術創成研究のメンバーである永井隆哉、鍵裕之、井上徹がコンビナーとなり、このシンポジウムを立ち上げました。プログラムについては以下のホームページをご参照下さい。

<http://www.highpressure.jp/forum/51/>

第1日目は東海建設グループによるJ-PRAC高温高圧中性子ビームライン“PLANET”の建設現状報告がなされ、東海建設グループのハードワークの中、着々と建設が進行している様子が印象的でした。また2日目は各計画班による報告が多く、各種予備実験がそれぞれの班で行われ、来年度以降の“PLA NET”での中性子実験に向けて、こちらも皆さん協力して進めている様子が印象的でした。さらに、ポスターセッションでも、計画研究班の発表が行われ、活発な議論が繰り広げられていました。

さらに、第1日目の会議終了後、本新学術のメンバーが会し会合（高圧中性子集会）が開催されましたが、その報告については下記をご覧ください。

尚、今回のシンポジウム開催に向けて、今回高圧討論会LOCの東北大学の方々には大変お世話になりました。特に今回のLOCの中心的役割を果たしており、新学術のメンバーでもある鈴木昭夫さんには、このシンポジウム開催にむけて多大にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。



高圧中性子集会報告

北海道大学大学院理学研究院：永井 隆哉

2010年10月20～22日に仙台で行われた第51回高圧討論会初日、高圧中性子シンポが行われた後、○新学術領域研究の中間評価の結果について、○プレスについての現状と今後のスケジュール、○各技術検討タスクフォース（素材、6-6、イメージング）の現状、○学術創成研究、についてそれぞれ現状の報告と議論がなされました。本プロジェクトに興味を持っていただいている30名程度の高圧力学会員の参加があり、活発な議論ができたと思います。お忙しい中、参加いただきありがとうございました。



IUCr High Pressure Workshop 報告



日本原子力研究開発機構：片山 芳則

9月19日から23日にかけて、米国テネシー州において、2010 IUCr Meeting of the Commission on High Pressure: Structure under Extreme Conditions of Pressure and Temperatureが開催されました。本会議は、国際結晶連盟の高圧コミッションが開催するワークショップで、3年に2回、総会が開催されない年に行われています。規模は100人以下と小規模ですが、各国の放射光や中性子施設の研究者や主要ユーザーが中心となって、高圧下の構造研究を中心に最新の研究成果が報告されます。本会議の特徴として、多くの場合、各国の放射光や中性子施設が開催の主体となることが挙げられます。今回は、オークリッジ国立研究所に建設され、2年前から稼働が始まった新しいパルス型中性子施設SNSの高圧担当者によって、同研究所に近いGatlinburgで開催されました。出席者は50人程度で、シングルセッションによって最新の成果をじっくりと聞くことができました。

PLANETの現状については、東京大学の鍵教授のHigh-pressure beamline (PLANET) at the spallation neutron source in J-PARC と題する招待講演によって紹介されました。また、液体水に関連するStructure of water under high pressure and high temperatureについても発表を行いました。

聴講した講演では、最近の測定技術の発展、特に高圧下での単結晶X線構造解析手法の発展に強い印象を受けました。ダイヤモンドアンビルセルを用いた単結晶構造解析が一般的となり、例えば、バリウムの非常に複雑な構造や、2酸化炭素の結晶構造の見直しなどが報告されていました。単結晶以外でも100GPaでの石英ガラスの測定の報告がありました。

残念ながら、中性子を利用した研究の報告はそれほど多くありませんでしたが、SNSの高圧ビームラインの現状がは会議の組織委員長であるChris Tulk氏から報告されました。

初日にはオークリッジ国立研究所の見学ツアーが開催され、研究用原子炉HFIRと2年前から稼働が始まった新しいパルス形中性子源SNSを見学することができました。SNSはJ-PARCに先行して完成し、すでに1MWと現在のJ-PARCの5倍以上のパワーを誇っています。この強力な中性子を用いた成果が上がりつつあるようでした。また、施設以外に、非常に広いスペースを持つ研究棟が建設されていて、人員もすでに400名程度と、充実した研究環境が整備されていることも印象に残りました。

2011年8月には、スペイン、マドリッドでIUCrの総会が開催されます。高圧関連のシンポジウムも複数開催される予定です。



本研究領域のメンバーが関係した受賞のお知らせをします。

井上徹氏（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター教授、マグマ班研究代表者）

平成22年度日本鉱物科学会賞を受賞されました。授賞題目は「マントル鉱物に及ぼす水の影響に関する高温高压実験による研究」で、同氏が長年進めてきた地球深部における水の挙動に関する先駆的な研究業績が高く評価されたものです。今後PLANETの完成によって高压中性子実験が可能になれば、さらに一層研究が発展することが期待されています。なお日本鉱物科学会賞は60年以上の歴史を持つ日本鉱物学会と日本岩石鉱物鉱床学会が平成19年に統合してから毎年、鉱物科学および関連分野で大きな業績を挙げた研究者1-2名に授与されている賞です。

張静雲氏（計算班・理化学研究所研修生・シンガポール南洋理工大）

平成22年11月に松江市で開催された第5回アジア高压力会議で、最優秀ポスター賞を受賞されました。ポスターのタイトルは「水素ハイドレート高压相の第一原理計算」です。同氏は計算班研究代表者で理化学研究所の飯高敏晃氏のもとでポスドクとして第一原理計算を進めており、本研究領域でも重要な研究対象となっている水素ハイドレートの高压下でのふるまいに関して興味深い研究結果をまとめたものです。アジア高压力会議は主に日本、中国、韓国の研究者が数年ごとに集まり高压関係の研究討論を行う国際会議で、今回も約100名が5日間にわたって討論をくり広げ、本領域の研究計画についても八木、服部の両名が発表を行ってきました。





研究集会の案内

関係者にはhp-neutronのメーリングリストで既に情報を流していますが、下記のように研究集会を開催します。

新学術領域研究・学術創成研究合同研究会

日時：2月21日（月）終日 懇親会も予定

場所：ホテルズ&リゾート ラフォーレ那須

<http://www.laforet.co.jp/lfhotels/nas/index.html>

東海チームの頑張りでPLANETの建設も着々と進んでいます。来年度にはプレスや検出器の導入、そして、コミッショニングの開始から本格的なPLANET利用実験と予定を着実に進めていくことになります。このような状況のなか、PLANETの建設・コミッショニング計画と協力体制についてはもちろん、本格的なPLANET利用実験が可能になったとき、最初に、どのようなサイエンスをどのような優先順位で行っていくかを具体的に議論する必要があると思われます。そこで、年度末で皆さんお忙しい時期であるとは思いますが、新学術領域研究・学術創成研究合同で研究会を行いますので皆さんのご参加を期待いたします。尚、さらに詳細については随時、hp-neutronのメーリングリストで連絡するとともに、下記のホームページにもアップしていきます。

<http://yagi.issp.u-tokyo.ac.jp/shingakujutsu/index.html>

編集後記

いよいよ来年度には”PLANET”ビームラインに超高压発生装置が設置され、本格的に中性子を利用した実験が開始できる状況になります。今まで各班での予備実験の方も着々と進められており、早い段階で”PLANET”ビームラインの成果が得られることを確信しています。そのためにも、是非、この2月の研究集会で各種の議論ができればと思います。ご参加の方、よろしく願いいたします。尚、まだhp-neutronのメーリングリストに加入されていない方は、是非この機会にご加入いただきたく思います。メーリングリスト加入希望の方は、井上もしくは山本までご連絡いただければ幸いです。

（井上 徹）

井上 inoue@sci.ehime-u.ac.jp

山本 yamamoto@issp.u-tokyo.ac.jp

ニュースレター NO.4

科学研究費補助金「新学術領域研究」

「高温高圧中性子実験で拓く地球の物質科学」

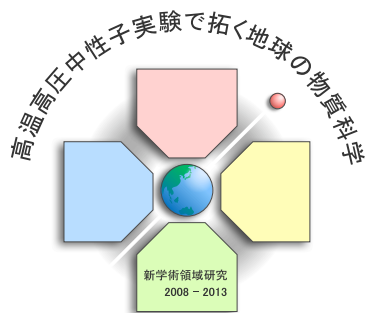
平成22年12月発行

発行責任者：八木 健彦（研究代表：東京大学物性研究所）

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5

編集責任者：井上 徹（広報担当：愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター）

〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5



<http://yagi.issp.u-tokyo.ac.jp/shingakujutsu/index.html>

ニュースレター NO.4

平成22年12月 発行

発行責任者：八木 健彦

編集責任者：井上 徹