2006年5月発行

融合 YU・KWAI

ISSN 0917-0731

●核融合科学研究会ニュース 32●

CONTENTS

炭素イオンを用いたがんの治療
放射線医学総合研究所
重粒子医科学センター
加速器物理工学部　部長
山田　聰 氏　2

核融合科学研究会第15回見学会報告
秘境の大プロジェクト「黒四ダム」と
「すばる」を支える精密機器
―黒部川第四発電所と
高精密制御機器工場―　3

事務局だより・編集後記　6

炭素イオンを用いたがんの治療

放射線医学総合研究所　重粒子医科学センター　加速器物理工学部　部長
山田　聰

重粒子線がん治療の専門家で、長年にわたり、臨床試験に携わっている山田聰先生をお迎えして、核融合科学研究会の講演会が行われました。

先生は、現在加速器物理工学部長として、重粒子線がん治療装置 HIMAC とサイクロトロン施設の運転・維持・管理を行うとともに、炭素線治療装置の小型化研究、9 研究機関の共同研究である先進小型加速器事業のとりまとめなどを行っておられます。

この講演では、「炭素イオンを用いたがんの治療」と題しまして、これまでの臨床試験10年間の成果を臨床面、ハード面から概観していただき、現在重点的に取り組んでおられる装置の小型化研究を中心とした研究成果の普及事業などについても簡単にご紹介頂きました。

鳥インフルエンザ、狂牛病など奇妙な病気が発生する昨今である。平成15年の厚生省人口動態統計で、日本人の死因は、ガン（30.5％）、心疾患（15.7％）、脳血管疾患（13.0％）、肺炎（9.3％）、事故（3.8％）の順となっている。依然ガンは死因のトップにあり、有効な治療法の開発が待たれる疾患である。

ガンの治療法として外科療法、化学療法、放射線療法が知られている。それぞれに長短があり、たとえば局所的なガンには外科治療が有効で根治性は高いものの患者には大きな負担がかかる、一方、化学療法は遠隔性のガンに用いられるが根治性は高くなく副作用が大きい。放射線治療は手術不能の局所的なガンに有効であり、根治性の点からは外科治療に劣る、また局所的な副作用があることがある。

講演のテーマである炭素イオンによる治療法は放射線治療に分類される。では、放射線によってなぜガンが治療されるかといえば、まず、放射線は体内を通過する。すると細胞内で電離や励起が起こり、化学的に活性の高いラジカルを生成する。このラジカルが細胞内の DNA を傷つける。細胞には損傷に対する修復力があるが、ある限度を越える損傷を被ると細胞は増殖できずに死んでしまう。レントゲンに使われる X 線が有害なのは周知の事実である。

という訳で、がん細胞以外の細胞も当然影響を受けるので、放射線治療の場合どうやってがん細胞を選択的にやっつけることができるか？ということが問題となる。従来の放射線治療では患部に対して回転しながら放射線を照射することで正常細胞への影響を減らし、がん細胞を選択的に死滅させる方法が用いられる。また、一回の照射量は制限されるので何回にも分けて治療を行わなくてはならない。

一般的には X 線が放射治療に用いられるが、放射線には色々な種類がある。一般にもアルファ線、ベータ線、ガンマ線などは良く知られている。アルファ線、ベータ線はそれぞれ、ヘリウム原子核、ベータ線は電子と粒子線であるの対して、ガンマ線は光のエネルギーの極めて高い光である。それぞれの放射によって人体に与える影響の仕方は異なっている。粒子線の場合、エネルギーが一定とすると軽い粒子ほど速度が速く体の奥まで届くあるいは人体を突き抜けやすい、一方、重いほど体の表面近くしか影響を与えない。すると、エネルギーと粒子を適切に選ぶ事で、うまく人体内部の適当な位置に粒子線の影響を与える事ができることになる。

炭素ビームを用いる事で効率的にガンを治療する事が可能となる。体内に入射した炭素ビームは、ある深さまではあまりエネルギーを与えずに速い速度でかけぬけ、途中で急に速度を落として多くのエネルギーを狭い領域与えて停止する。この領域の深さや大きさ、自由に調節することができるので、標的となるがんの部分に調整すれば、がんのまわりの正常組織にはほとんど影響をあたえず、ガンの領域だけに高い線量を集中して照射することが可能となる。

その他、炭素線を用いた治療の長所として、１）治療時の痛みがなく、副作用がほとんど認められない。２）肺がん、肝がんなどでは短期（１～４日）の治療が可能。３）骨・軟部肉腫など、手術や他の治療に適さない難治性のがんにも有効であること、が挙げられる。炭素イオンに比べ軽い陽子線を用いた治療も世界的に広く行われている。X 線に比べると、集中性に優れているが深部の治療は難しい。また、炭素線に比べ治療回数が多くなる。

炭素線を用いた重粒子線によるガン治療は優れた点が多い。この治療はこれまですべて臨床試験として行われてきたが、平成15年11月より高度先進医療を行うことが承認され、試験の段階から対象患者から通常の医療費に加えて高度先進医療のための特別料金の徴収が可能となっている。日本では、粒子線治療の適応患者数は年間３万人を越えるとされ（全がん患者数の約７％）、これを治療するには30台以上の治療装置が必要である。現在の重粒子線を用いた治療設備は極めて大型かつ高価である。今後の粒子線治療のより広い普及のためには治療装置の小型化を目指した研究開発が不可欠となっている。一日も早い普及を願いたい。

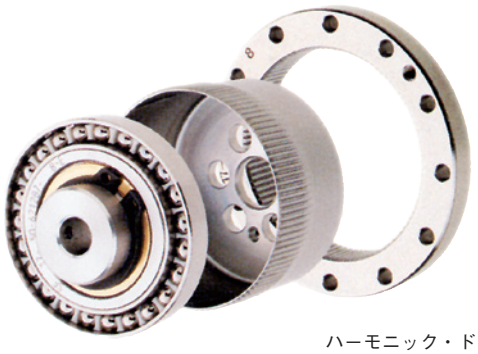
核融合科学研究会第15回見学会報告
秘境の大プロジェクト「黒四ダム」と「すばる」を支える精密機器
—— 黒部川第四発電所と高精密制御機器工場 ——

核融合科学研究会第15回見学会が、平成17年９月29日、30日の２日間にわたって開催されました。今回は、「すばる」望遠鏡の直径8.3m の主鏡の鏡面精度を0.1μm 以下に保つために使われている精密制御機器等を製造している（株）ハーモニック・ドライブ・システムズ穂高工場の製造現場を見学した後、有名な黒部ダムを含む関西電力（株）黒部川第四発電所を、長野県信濃大町側から富山県宇奈月側へ向かって移動しながら見学しました。日本の高度経済成長期のエネルギー需要をまかなうため、関西電力が社運をかけて建設した黒四発電所を建設当時の工事用ルートに沿って訪れました。人の踏み込むことを許さなかった秘境における大プロジェクトの現場と超精密な機器製造の現場という対照的な施設を見学した２日間となりました。黒四発電所の見学ルートは、一般には公開されていない特別なコースだったため、参加者は23名に限定させていただきましたが、盛況な見学会となりました。

初日はバスで長野県穂高町の（株）ハーモニック・ドライブ・システムズ穂高工場へ向かいました。穂高町は周辺５町村の合併により、この10月１日より安曇野市となりましたが、北アルプスを望む、水と空気の澄んだ緑豊かな田園都市です。（株）ハーモニック・ドライブ・システムズは、米国の発明家 C.W. マッサーが考案した波動歯車装置「ハーモニック・ドライブ」の製品化により1970年に設立され、ハーモニック・ドライブをはじめとする高精密な制御機器を開発・製造しているハイテク企業です。ハーモニック・ドライブは、従来の剛性を高めることにより高速性能・精密性を上げようとした歯車機構に対して、金属のたわみ（弾性）を応用するという画期的な動力伝達方式を適用することにより、構造がシンプルとなり、小型軽量化を可能とした高精度な歯車減速機です。金属の弾性を利用するという従来の常識をくつがえしたハーモニック・ドライブは、わずか３点の基本部品からなっており、高い減速比、小さなバックラッシュ、高精度で大きなトルク容量を持つなどの特徴を有しています。工場の概要説明を受けた会議室のテーブルには、このハーモニック・ドライブが置かれてあり、実際に手にとって軸を回したり、３つに分解したりしましたが、内側の楕円状カムのボール・ベアリングを回すと、動力を伝える外側の薄肉カップ状の金属弾性体がたわむのがよくわかりました。

このように金属のたわみを利用しているため、疲労破壊しないような応力緩和、金属材料の選定、高精度の切削加工技術等が必要だそうです。これまでに培ってきた精密加工技術、制御技術をもとに、高精度位置決めという高付加価値にねらいを定めて精密制御機器の開発・製品化を総合的に行うことにより、このハーモニック・ドライブの性能を最大限に引き出すトータルモーションコントロールの構築を目指しているとのことです。産業用ロボットや半導体製造装置をはじめとして、火星探査機のロボットアームや車輪等の制御、「すばる」望遠鏡の大型主鏡の制御、ASIMO 等のヒューマノイド・ロボットの腕や足、原子炉の制御棒の制御等にハーモニック・ドライブを用いた高精密制御機器が利用されているそうです。また、センサー、制御、モーター等の開発も合わせて進めており、東大と共同で開発を行っている高速・高精度のロボット・ハンドの様子がビデオで紹介されましたが、ロボットがボールを連続的に打ち上げる様子は、総合的な高精度位置決め技術の集積であると感嘆しました。

引き続き工場を見学しましたが、最近、事務所における１人あたりのスペースを決めて合理化・統合を進めたところ、大きなスペースが生まれたとのことで、新たな利用を考えているそうです。製品は受注生産で、組み立ては18名がチームとなったセル方式を採用しています。製品の測定室は、気温20℃、湿度50％の環境に保たれており、ミクロン程度の防塵も施して、精密な製品管理を行っています。加工場に入ると油のにおいが漂っていました。ハーモニック・ドライブの部品は、外加工、内加工、歯切り、といったラインの流れで加工されますが、100μm 以下の薄肉加工なため、ジグを含めた切削加工技術に高度なノウハウがあるそうです。また、出荷検査、梱包も同一フロアで行われ、



ハーモニック・ドライブ®

一人で作業を完結させています。トヨタで実践されているカンバン方式を取り入れており、工場内は事務部門も含めて、きわめて合理化されているという印象を受けました。

敷地内には、I・K KANという研究開発棟があり、ハーモニック・ドライブの精度をさらに10倍に高めるための研究開発を行っています。I・K KANはそのための生産環境を備えた次世代工場のプロトタイプとして設計されたそうです。４層構造の基礎により揺れを制御し、加工室は23±0.5℃に、測定室は23±0.3℃に温度制御し、また、空調の風が直接作業領域に当たらないよう、スーパーコンピュータを用いた空気循環設計がなされているとのことです。このような環境のもと、ライン作業者の技能の向上とその伝承も狙っているとのことで、会社の規模は小さいものの、こうした精度の向上に向けたたゆまぬ努力が、日本のハイテク産業を支えているのだと実感しました。

このような高精度制御機器を核融合装置に応用するためには、高磁場環境下での使用と高真空中での使用に耐えられなければなりません。その点をお尋ねしたところ、現在、低磁性体を用いたハーモニック・ドライブや真空中で使用できるハーモニック・ドライブを開発・研究中とのことでした。是非とも実用化して欲しいものです。

❹ 翌日の２日目は、宿泊先の大町市のホテルからバスで扇沢駅まで向かいました。扇沢駅は立山黒部アルペンルートの出発点ですが、そこから後立山連峰赤沢岳の直下を貫く6.1kmの関電トンネルをトロリーバスで黒部ダムへ向かいました。途中、世紀の難工事といわれた大破砕帯の位置が、トンネル内に数箇所示されていました。黒部ダム駅に到着して階段を上ると、黒部ダムの勇壮な姿を目の当たりに見ることができました。黒部ダムは昭和38年に完成した、高さ186m、堤長492m、貯水量約２億㎥の日本最大のアーチ式ドーム越流型ダムです。ちょうどダムからの放水時で、曇り空でしたが、展望台から豪快な放水の様子と北アルプスの連峰を眺めることができました。

黒部ダムからは黒部トンネルを専用バスで進みました。黒部トンネルは幅4.4m、高さ4.5m、全長10.3kmの黒四発電所への資材用トンネルで、乗車前にヘルメットを渡されました。並行して下部に直径4.8mの発電用の水路トンネルが黒四発電所まで続いているそうです。これらのトンネルは、５箇所の横坑を使って土砂を出しながら、上流と下流から同時に全断面を掘り進めたそうです。１日当たり25m程度、１ヶ月当たり520m程度のペースで岩盤を破砕しながら進み、貫通時の誤差は黒部トンネルで４cm、水路トンネルで２cmだったとのことです。途中バスを降り、土砂出しに使用していた樽沢横坑から外に出ました。目の前に剣岳がその勇姿を現しましたが、反対側（裏側）から見るという貴重な風景です。頂上付近にわずかに残された氷河を見ることもできました。

バスは作廊に到着し、ここでインクラインに乗り換えました。インクラインは傾斜角度34度、斜距離815mの急傾斜の長大斜坑を往復するケーブルカーで、２台が途中すれ違うように平行して運行されています。また、巨大な発電・変電用機器を発電所へ輸送するため、積載能力は25トンで設計されています。数年前の大晦日の紅白歌合戦で、中島みゆきが黒四発電所トンネル内で歌ったときは、スタッフ100名と４トントラック３台分の資材を運んだそうです。20

分程で標高1,325m から869m まで下り、黒部川第四発電所に到着しました。

黒部川第四発電所は国立公園内の自然環境を守るため、また厳しい自然環境のため、地下200m に設置されています。発電機は４基あり、現在２号機が分解補修中でした。発電機室内のクレーンのブレーキ部にアスベストが使用されていることが判明したため、通常の居住環境と変わりはないものの、それを除去するまで一般の立ち入りを制限しているとのことで、ガラス越しに見学しました。現在の発電出力は33万５千 kW で、水力発電所としては日本で４番目の規模です。350km 離れた大阪の高槻まで275kV で送電し、その送電ロスは約８％だそうです。建設に７年を要して1963年に竣工、建設費は513億円、延べ作業者数は1000万人を超え、171名の尊い犠牲の上に完成した、世紀の大事業でした。戦後の復興間もない頃の事業で、世界銀行から130億円の融資を受けるなど、まさに関西電力の社運をかけた大工事でした。建設費は現在の貨幣価値に換算すると1.5兆円程度に相当するとのことで、3000億円で100万 kW 級の原子力発電所が建設できることを考えると、当時の規模の大きさが想像できます。

黒四発電所の運用には、その立地条件から、地元自治体との間にいくつかの取り決めが交わされています。観光用に時間を限って黒部ダムの放水を行う、黒部ダム湖に遊覧船を就航させる、工事用道路を観光用に利用する、９月～10月の１ヶ月間に登山道が利用できるよう毎年修繕する、等で、その費用は毎年数千万円になるそうです。

制御室は平成５年より無人化され、下流の宇奈月町から遠隔制御されています。黒部ダムの水位が表示されており29m でした。発電に使用する水位は60m で、夏場から冬場は50～60m に、３月末には０m にするのだそうですが、今年は通常より水位が低いとのことです。水力発電は電力調整用に利用されることから、発電は昼間のみで、夜間の発電は行いません。そのため年間の利用率は40％程度だそうです。ダムには土砂の堆積があり、現在は３割程度埋まっているそうですが、ダムの寿命は100～150年なので問題ないとのことです。水車等の発電機部品の交換は、インクラインで運んで行うとのことです。なお、中島みゆきが控室として使用した部屋を見せていただきましたが、当日食べたという弁当のメニューまで展示してありました。

発電所を後にして上部軌道内を運行するバッテリー・トロッコに乗車しました。上部軌道は全長6.5km で、仙人谷ダム建設のために、下流の欅平からの輸送ルートとして作られたものです。周辺の河川の勾配が急であるため、欅平から河川沿いに鉄道を延長することができず、竪坑とトンネルを開削して作りました。トロッコは人が座って頭が天井に着く程度の大きさで、１両に８名程度が乗車できます。程なく仙人谷ダムに着きましたが、黒部ダムの水は、黒四発電所も含め、３回発電に利用され、この仙人谷ダムは下流の黒部川第三発電所の取水口となっています。ここからは高熱隧道と呼ばれる温泉鉱脈の中を500m 程通過します。すぐに強烈な硫黄臭がし、窓が曇ってきました。最高岩盤温度は175℃にも達し、昭和10年代の建設当時には、ダイナマイトが自然発火したそうです。高熱隧道を抜けてしばらくすると、トロッコは上部軌道の終点である欅平の上部に到着しました。このトンネルから横坑を伝わって中腹に出て、黒部峡谷を眺めてからトンネルに戻り、竪坑エレベータに乗りました。このエレベータは資材の運搬も行える標高差200m の全地下式で、建設当時は日本一だったそうです。

竪坑エレベータで下り、そこから列車に乗ると、すぐにトンネルを抜けて、黒部峡谷鉄道の終点である欅平駅に到着しました。黒部峡谷鉄道は全長20.1km で、トンネルが41箇所、橋が22箇所あります。冬期は積雪、雪崩等のため、線路をはずし、線路わきにある冬期歩道を６時間かけて歩いて欅平まで行くそうです。関電関係者用の列車に乗りましたが、観光客を乗せた列車ともすれ違いました。途中、木屋平ダム、新黒部川第二発電所、黒部川峡谷にかかる猿専用の吊り橋、宇奈月ダム、湖上に浮かぶ城をイメージした新柳河原発電所などを見ながら、宇奈月駅に到着し、解散しました。

黒部川第四発電所の建設は、戦後日本の復興時に、秘境の地で行われた壮大な大事業であったことが、今回の見学であらためて知ることができました。それはまさしく日本が総力を挙げて取り組んだ「プロジェクト Japan」であり、その後の高度経済成長の土台になったと言えます。核融合研究も、国際熱核融合実験炉（ITER）の建設地がフランスに決まり、国際協力での建設が始まろうとしていますが、将来の恒久的エネルギー源の実現を目指して、次の実証炉へ向けた「日本のプロジェクト」を新たに立ち上げる必要があるとの思いを抱きました。また、ハーモニック・ドラ

イブに見られるような高度な先進技術も地道に進めていく必要を感じた見学会でもありました。

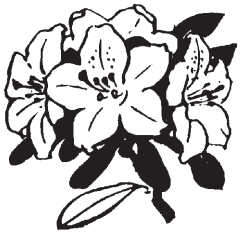
今回の見学会の企画にあたり、会員の関西電力（株）と（株）クリハラントのご協力を頂きました。ここに改めてお礼申し上げます。今後も会員の皆様に満足していただける見学会を企画したいと思いますので、見学したい施設の希望、推薦等がありましたら、事務局までお気軽にご連絡下さい。

事務局だより

＊＊核融合科学研究会評議員会・総会および特別講演会のお知らせ＊＊

〈核融合科学研究会評議員会・総会〉

日　時　平成18年５月16日（火）14時30分より15時30分
場　所　セラミックパーク MINO
議　題　平成17年度事業報告および決算報告
　　平成18年度事業計画および予算案
　　役員の改選・顧問の委嘱について



〈特別講演会〉

日　時　総会と同日開催、15時40分より17時
講　師　国立天文台　野辺山宇宙電波観測所所長
　　国立天文台教授／総合研究大学院大学教授／
　　東大大学院理学系研究科教授（併任）
　　坪井　昌人氏
演　題　電波望遠鏡でみた宇宙

坪井先生は、1988年に東京大学にて理学博士を取得され、ご専門は電波天文学です。現在は、銀河系中心の構造と活動性の観測的研究、銀河団の観測的研究などを精力的に進めておられ、同時に、これらの観測を可能にするための電波望遠鏡、高感度受信機の開発研究も多年にわたり続けてきておられます。

今回の講演では、電波望遠鏡が明らかにするダイナミックな宇宙を紹介していただきます。20世紀中頃までは、人類は恒星など熱いプラズマから発する可視光で見た整然とした宇宙を本当の宇宙と信じてきました。ところが別の波長で見ると、星間ガス、宇宙線と銀河磁場など、宇宙の違う側面が明らかになってきました。電波天文学は、最初で、そして最も成功した『違う波長の天文学』です。

先生は科学雑誌にも色々な楽しい話題を提供されています。ご多忙な先生に、夢のあるお話をしていただきます。

編集後記

平素は核融合科学研究会の活動に格別のご高配を賜りましてありがとうございます。

平成18年度会費納入のお知らせをいたしましたところ、早速にお取り計らいくださいまして誠にありがとうございました。

会員の皆様に、厳しき情勢にもかかわらず、当研究会の活動をご理解いただき、ご支援いただいておりますこと、感謝申し上げます。

今後とも、当研究会の活動ならびに核融合科学研究所への一層のご理解・ご支援をよろしくお願い申し上げます。

核融合科学研究会ニュース
第32号（2006年5月）

融　會

編集・発行
核融合科学研究会

〒509-5292　岐阜県土岐市下石町322-6
TEL 0572－58－0622／ FAX 0572－58－0626
E-mail：yu-kwai@tcp-ip.or.jp
URL：http://www.tcp-ip.or.jp/~yu-kwai/