

# FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 134
Science and Technology News	

発行  
一般社団法人  
未踏科学技術協会  
平成 24 年 7 月 25 日発行  
〒105-0003  
東京都港区西新橋 1-5-10  
新橋アマノビル 6 階  
Tel : 03-3503-4681  
Fax : 03-3597-0535  
Email : fsst@sntt.or.jp

## <FSST NEWS No.134 目次>

### <トピックス 1>

構造強化高強度コイル化手法(Yoroi Cil)の開発

中部電力 長屋 重夫……………2

### <第 16 回超伝導科学技術賞を授賞して>

(1) My Encounter with and Work on Flux Jumping

MIT Francis Bitter Magnet Laboratory Yukikazu IWASA……………4

(2) 鉄系超伝導体の薄膜・デバイス

東京工業大学 平松 秀典……………7

(3) 超伝導複合テープ性能評価における力学的研究の重要性 京都大学 落合庄治郎……………11

(4) 手のひらサイズの超伝導バルク磁石の開発 日立製作所 松田 和也……………13

(5) ニュートリノビームライン超伝導磁石システムの開発と安定運用

高エネルギー加速器研究機構 荻津 透……………16

(6) 直流超伝導送配電システムの研究開発とその役割 中部大学 山口作太郎……………18

### <会議報告 1>

ICSM2012 会議報告

産業技術総合研究所 伊豫 彰……………21

### <会議報告 2>

ICEC24-ICMC2012 会議報告

九州大学 船木 和夫……………22

### <研究室紹介>

(1) 東京工業大学(細野研究室)……………24

(2) J-PARC センター 低温セクション……………25

(3) 中部大学 超伝導センター……………26

(4) 日立製作所 日立研究所……………28

(5) 九州大学 超伝導システム科学研究センター……………29

(6) 東京大学(藤森研究室)……………30

○研究会の動き……………31

○第 1 回超伝導科学技術セミナーのご案内……………31

○平成年 23 度 事業報告……………32

○平成年 23 度 収支決算書……………33

○国内超伝導関連会議/国際会議及び国外の主要な会議……………34

## <トピックス 1>

### 構造強化高強度コイル化手法 (Yoroi Coil) の開発

#### Development of High-Strength Coil (Yoroi Coil) by Structural Reinforcing Method

中部電力(株)

長屋 重夫

Chubu Electric Power Co., Inc.

S. Nagaya

#### 1. はじめに

イットリウム系線材は、磁場特性に優れているものの、その線材構造に起因した短所を持ち、開発の進んでいたビスマス系線材に比べ、機器応用での性能を決定する電流密度など実質的な超電導特性では差が無く、また長尺性やコストなどの実用性では逆に劣っていた。

唯一、ビスマス系線材に対して優位な特性として、基板自体が高強度であることを利用した高磁界応用が、当初期待されていた。

しかし線材の長尺開発が進み、コイル応用の検討が行われると、超電導特性の改善に向けて行われた種々の手法が、コイル化に対して致命的な弱点となることが判明した。

特に、線材の厚さ方向の強度、すなわち積層構造となるイットリウム系線材の層間の強度が、高超電導特性実現のために限りなく平滑な界面で構成されているために、非常に低く、従来のコイルと同様にエポキシ等で含浸、一体化すると線材間に発生する半径方向の応力によって、線材内部の層間剥離を起こす問題が発生していた。

対策として、コイル内部に発生する内部応力を線材の剥離力以下に制御するか、線材自体の層間強度を上げることが考えられるが、どちらの対策も線材に依存し、イットリウム系線材は、依然そのような適用に耐えられるほどバラツキの少ない線材とはなっていないのが現状であった。

今回、このようなイットリウム系線材の弱点を抑制し、線材特性に依存しないコイル化手法を開発したので、以下に紹介する。

#### 2. 構造強化高強度コイル (Yoroi coil)

超電導コイルでは、大電流により、強い磁場を発生させることができるが、線材には、これを伸ばそうとする強い電磁力(フープ力)が働く。この為、これまでの

超電導コイルは、補強線材を共巻する構造や、線材を補強材内部に充填する構造あるいは外部に補強用の金属材料を巻く構造によって超電導線材の強度を補う手法をとり、補強材料の機械強度でコイルが支えられる電磁応力が決定される。

一方、イットリウム系超電導線材は、ハステロイのような高強度金属を基板として薄膜を積層した構造になっており、高強度基板の適用によって線材の機械強度が高く、線材自体が強い電磁応力を支えるコイル構造が実現でき、これまでの超電導コイルよりもはるかに強い電磁応力に耐えることが可能となる。

コイルに作用する電磁力は、コイルの発生磁場( $B$ )と電流密度( $J$ )とコイル径( $R$ )の積( $B \times J \times R$ )で決定され、超電導線材は高い電流密度で電流を流すことが出来るため、強磁場を発生させられる一方、高電流密度の通電と強磁場発生を径の大きなコイルに適用すると、電磁力( $B \times J \times R$ )が著しく大きくなる。

したがって、大型コイルでは作用する応力がコイルの強度を超えてコイルの特性低下や破壊が生じないよう、電流密度を低下させるため通電電流を抑制しており、超電導線材の通電特性を十分に発揮することが出来なかった。

金属系超電導コイルの電磁力に対する耐力は300~400 MPa程度であり、イットリウム系超電導コイルでも、超電導線材の強度の限界である1,000 MPaが最大となると考えられていた。

また、イットリウム系超電導コイルでは、上記の線材の剥離問題もあり、200 MPa程度の実力のコイルで世界最高の強度を達成したと報告されていた。

今回の開発では、超電導線材に作用する電磁力を図1のように超電導線材だけでなく、コイルの面方向の側板で支えることによって、超電導線材の強度の限界を超える電磁力に耐えることが可能となる。

この新構造コイルは2,000 MPa級の電磁力に耐えることが可能で、従来のイットリウム系超電導コイルの材料限界の2倍、金属系超電導コイルの6倍という、これまでのコイルの機械強度による制限を変える技術であり、大型の強磁場コイルほど超電導線材の通電特性を発揮できる構造である。



従来のコイル構造

本開発のコイル構造

図1. 耐電磁応力メカニズムの構造による違い

図2に今回開発したコイル外観、表1にコイルの仕様、図3に東北大金材研に於いて実施した試験結果を示す。

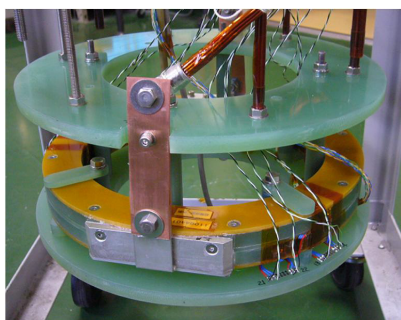


図2. 今回開発したコイル外観

表1. コイルの仕様

コイル諸元	
コイル構造	ダブルパンケーキ
内径	219 mm
外径	240 mm
ターン数	34
超電導線材	CVD-(Gd, Y)BCO-1BAD
線材幅	10 mm
線材厚	300 $\mu\text{m}$ (絶縁被覆込)
線材長	52 m
モールド	パラフィン

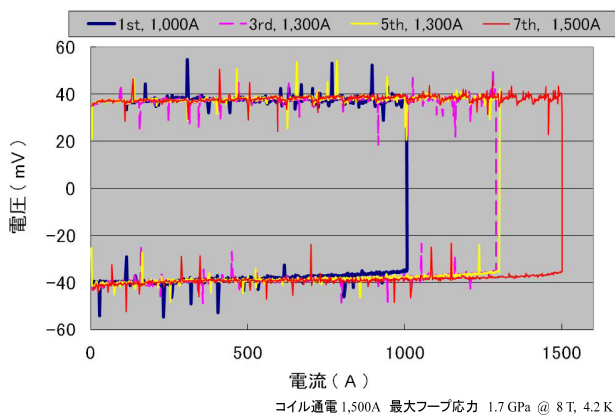


図3. フープ力試験における通電結果(東北大学金属材料研 磁場センターにおける測定)

### 3. 低温硬化塗布絶縁手法の開発

現在、超電導コイルの電気絶縁技術は、樹脂テープを超電導線材に巻く手法が採られているが、これは、通常のエナメルなどのワニス被覆は、硬化させる処理温度が高く、イットリウム系超電導線材に限らずビスマス系においても特性に影響を及ぼす可能性が高く使用出来ないためである。

しかし、この樹脂テープを巻く絶縁は、コイルなどの曲げ加工の際に、樹脂テープが切れたり偏ったりして絶縁性能が低下したり、超電導線材に凹凸が生じて

線材間に不均一な応力が発生し、劣化を引き起こしたりする可能性などの問題があり、最終的にはエポキシ等の樹脂含浸を行って一体化することで対応している。

しかしながらエポキシ含浸には、線材剥離の問題がある。今回、超電導特性を低下させない低温で硬化が可能な液状樹脂を超電導線材被覆に適用し、曲げに強いフレキシブルな絶縁被覆を形成することで、エポキシ含浸を不要とした。また、この樹脂は従来の樹脂テープに比較して高い熱伝導率を有しているため、伝導冷却での適用も可能となる。

図4に塗布絶縁を施した線材断面を示す。

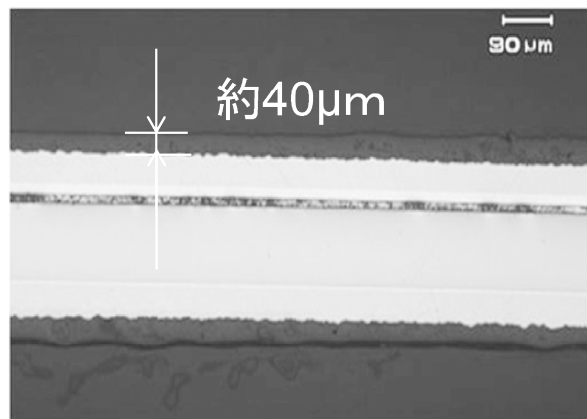


図4. 塗布絶縁を施した超電導線材断面

### 4. おわりに

今回の開発は、イットリウム系線材が持つ高機械強度特性を最大に活かしたコイル化手法の開発であり、線材にかかる応力をコイル側面の構造材で強化するコイル化手法である。

磁気エネルギーで電力を貯蔵するSMESにおいて、大容量化を行う場合、コイルが大型化し、コイル強度がその制約因子となっていたが、今回の開発により大幅に改善され、同じ大きさのイットリウム系超電導コイルでは10倍のエネルギー貯蔵が可能となる。

この手法は、マグネットの小型化、軽量化を可能にし、また超電導線材の特性を最大に利用できるため、全体の低コスト化が可能であり、超電導技術の実用化の促進につながるものと考えられる。

## <第16回超伝導科学技術賞を授賞して>

### (1) Personal Recollection (1961—1967)

#### — My Encounter with and Work on *Flux Jumping*

Yukikazu Iwasa  
MIT Francis Bitter Magnet Laboratory

#### Preface

Instead of an article on my work in the field of superconducting magnet technology that was deemed worthy of the 2012 Distinguished Award on Superconductivity Science and Technology, I would like to recollect the period 1961-1967, *my years with flux jumping*, the first disturbance source identified in the superconducting magnet. It was *flux jumping* that pulled me into this field, in which I've remained ever since. Before this, let me briefly describe here my years, from 1956, when I left Japan and eventually went to the Massachusetts Institute of Technology (MIT), to 1960, the year before I began my undergraduate thesis.

**1956—1957** In preparation to study at MIT, after having graduated from Doshisha High School, Kyoto, in March 1956, I attended for 2 and 1/2 months (April—June) a private all-dorm high school in Honolulu and moved in mid June to Salt Lake City, Utah to study for a period of one year at Westminster College, a small liberal arts school. There too I stayed in a dorm and was exposed to, as in Hawaii, American teen-age life style—I would continue this dorm life the first 4 years at MIT, where I started my freshman year in September 1957. In June 1957 to get to Cambridge, Massachusetts, from Salt Lake City, I drove solo my 1954 Ford, which I had bought in Salt Lake City in the spring of 1957.

**1959—1960** In the summer of 1959, I had a job in the Cryogenic Engineering Laboratory (CEL) of the Mechanical Engineering (ME) Department. There I was introduced to liquid helium and superconductivity by the CEL director Prof. Sam Collins.

To get to Pasadena, an LA suburb, for my summer job in 1960, I planned to drive my Ford. When my classmate Mike Walker—later, *in flux jumping*—heard

my plan, he wanted, with his sister, to come with me to LA, to visit their mother. In early June, Mike and I left Cambridge, spending the first night in his uncle's in Detroit, where his sister joined us. Next morning, three of us headed for LA, taking a 3-hour shift turn—one driving, the second keeping the driver awake, the third sleeping in the rear seat. Sweaty (no A/C in my Ford) and needing a hot shower, we stayed overnight in a motel in the middle of nowhere in Wyoming. We got to their mother's in LA, after ~70 hours (~5,000 km) since we left Cambridge. Then, I drove alone to Pasadena.

One memorable article in Time magazine that summer was an announcement of the creation at MIT of the National Magnet Laboratory (NML) dedicated for research in solid-state physics and development of magnet technology with a \$10 million grant from the Air Force Office of Scientific Research (AFOSR). That summer in 1960 I watched on TV the Democratic Party Convention, held in nearby LA, that nominated Senator John F. Kennedy (JFK) of Massachusetts for the next President in the coming fall election.

#### Years 1961—1967

**1961—1965** Although originally scheduled to graduate with a Bachelor's degree in June 1961, at the beginning of my senior year (fall 1960) I was placed, with 4 other fellow ME seniors, in the ME Department's special 5-year program to pursue both Bachelor's and Master's degrees with a single thesis and graduate in June 1962, a year after the rest of my 1961 classmates—years later John Stekly told me that he too had been in this program in the 1950s. As suggested by my thesis advisor, Prof. Collins, I chose superconductivity for my 2-degree thesis. For this experimental thesis, he recommended a second advisor, from the Electrical Engineering (EE) Department. Dr. Paul Gray, a young assistant professor, whose EE undergrad course I had taken in 1959, became my second thesis advisor.

My thesis was on magnetization,  $M$ , measurement of NbZr (the predecessor of NbTi) monofilament—until in the late 1960s, all superconductors were of monofilament. This topic was chosen because Prof. Gray and his colleague had just bought a 5-T superconducting magnet from Magnion, a “high-tech” company in Cambridge. At that time there was not much modern equipment in the EE Department. So, Prof. Gray and I

used a galvanometer, outmoded by then, to integrate  $dM/dt$  signals. Unlike most advisors, Paul was with me at every measurement, *my thesis* work. In a way our Magnion magnet, needed be charged at an extremely slow rate, suited to the  $M$  measurement with a galvanometer, one data point at a time, with my advisor looking through a viewfinder and reading aloud the galvanometer mirror's deflection angle ( $\propto M$ ). Then, after a few data points, the next  $M$  point, instead of going up with applied field, was nearly zero. We knew our measurement was correct. A few days later, we learned that a phenomenon called *flux jumping* caused this anomaly: it was my first encounter with *flux jumping*. *Flux jumping* made Magnion magnets totally unreliable, bankrupting the company within a year. It would taunt the magnet engineer during most of the 1960s. Finally, Paul determined that the galvanometer was utterly unsuitable and found shortly afterwards that there was *one* microvoltmeter in the *entire* MIT campus: it belonged to Bruce Montgomery, Head of the Magnet Technology Division (MTD) of the NML. Unlike most experimentalists who would guard their equipment closely, often reluctant to let even a close friend use, Bruce was truly generous: he allowed a young professor whom he had never met borrow his prized equipment, to be used *outside* NML. At that time I did not meet Bruce, who would later become my mentor and a lifelong friend.

In the spring of 1962 Paul advised me to work on magnetization of superconductor for my PhD, in the EE Department. For a long while, however, I could not come up with a great topic. So, in 1963, Paul suggested that I work with Bruce at NML until I could find a topic suitable for my PhD thesis. That fall as Bruce wanted to interview me for a staff position, I went to his office in the newly dedicated (April 1963) NML and met him for the first time, on what would soon become an unforgettable day in the U.S. history.

In the fall of 1963, Prof. John Slater, very well known at MIT, was teaching his physics grad course, *Quantum Theory and Atomic Structure*. Slater came to MIT from Harvard in 1930 to *head at 30* the Physics Department and would remain so for the next 21 years, and in the process help make MIT, according to Richard Feynman, “the best school for science in the country.” He had been teaching this course (or its variants) for years on the same days (Monday-Wednesday-Friday); time period

(2:05 pm—2:55 pm); classroom. Those interested in the subject, including many non-physics majors like my EE friends and I, felt compelled to take his course. At 2 pm that Friday afternoon on November 22<sup>nd</sup>, before Slater arrived, there was already a rumor in the classroom that JFK had been shot in Dallas, but was still alive. Right after 2:30 pm when Slater finished writing, as always very neatly, on the blackboard Schrödinger's equation for the hydrogen atom, there was a knock on the door; Slater was given a note by his secretary. With no visible sign of disturbance he walked back to the center of the lecture hall and calmly announced to the class, in his usual monotone, “President Kennedy died in Dallas at 12:30, Dallas time.” The entire class was stunned, but Slater, showing absolutely no emotion, and not even a moment of silence, swung around, pointing the equation on the board, continued, “Now, this equation...” He ended his lecture, as always, precisely at 2:55 pm. Everyone seemed to be in chaos outside the classroom, and there was an announcement that MIT would officially close at 3 pm.

With MIT officially closed at 3 pm, would my job interview with Bruce Montgomery at 4 pm be still on? Anyway, at the appointed time I went to Bruce's office in the Magnet lab for my interview. He was outside his office, waiting for me, a tear in his eyes. We didn't talk much, except to express our shock and sadness, and I was out of his office after only ~15 minutes. As I was leaving, he said if I wanted to join his Division, I would be welcome as a research staff starting September 1964.

In the fall of 1964, Bruce assigned me to further work on magnetization. By then, from, e.g., a 1963 paper by Lubell, et al. at the Westinghouse Research Labs [1], I knew that *flux jumping* could devastate a superconducting magnet: it bankrupted a magnet company. In 1967, after I had finished my PhD thesis, I finally met Marty Lubell at Westinghouse in Pittsburgh. When he realized that *his classmate* at MIT was my thesis advisor, he lamented, saying he suddenly felt old. (Sadly, Marty, whom I got to know well, especially after his move to the Oak Ridge National Laboratory, passed away in January this year at age 79.)

My first journal paper, in 1965 with Bruce, was naturally on *flux jumping* [2]. Just before our paper came out, Bruce brought an article by Walker and Hulm [3], Lubell's colleagues at Westinghouse, saying it should interest me. When I saw the name Walker, I turned to

Bruce and said, "I think this Walker is my classmate and friend Mike Walker." In the paper they claimed, without direct measurement, that the magnetization of a monofilament NbZr was at first wavy, i.e., nonuniform, along its axial length. In their view, *flux jumping* is an event in which, what I would call later in my PhD work "macrovortices," spatially set up initially when magnetized, collapsed sequentially. "How can the magnetization of a superconducting wire be nonuniform at first along its length?" Bruce suggested that I should look into this spatiality of magnetization. Next day, I went to Paul's office and said that I had just found a great thesis topic and was ready to begin my PhD thesis.

**1966—1967** In February 1966, I enrolled in the EE Department as a doctoral candidate and was appointed Research Assistant (RA), funded by the Atomic Energy Commission (AEC), later to become the Department of Energy. As today, an RA, awarded full MIT tuition, was paid a monthly stipend. In March, I received a letter from the U.S. Immigration Office stating that I would be deported, because I was circumventing a law, which permitted a foreign student, before returning home, to work 2 years in the U.S. after graduation to gain practical experience. The Immigration Office thought that by going back to school I was trying to stay in the U.S. beyond my legal limit. I was told to leave soon or apply for Permanent Visa. In 1966, the application procedure was simple: I did all my paperwork myself. MIT, AFOSR (NMR sponsor), and AEC (my RA funder) agreed to be the 3 sponsors required by the Department of Labor to certify that I, and no other U.S. citizen, was qualified to conduct this research. My application was approved quickly, in 3 days.

Paul was my thesis supervisor, but it was more a formality, because his speciality was not superconductivity. It was really through our friendship formed during my earlier thesis work. My advisor at NML was Bruce until the summer of 1966, when he took a 2-year leave of absence from MIT to write, now classic, *Solenoid Magnet Design*, at the University of Lausanne, Switzerland; the book became his ScD thesis at the university. In his place John E.C. Williams, originally from the Culham Centre for Fusion in England, became my NML advisor—in 1982, John would succeed Bruce to head the MTD. Paul also supervised my fellow PhD student at NML, Bill Hackett, who worked on

superconductivity at microwave frequencies. Bill's advisor at NML was Dr. Emanuel Maxwell, quite well known for his discovery of the isotope effect in superconductivity. Maxwell did his PhD thesis under Slater and was my junior year physics recitation instructor. As Bill and I were taking a course on superconductivity taught by Prof. Michael Tinkham at Harvard (MIT and Harvard students could, and still can, take courses at either school), one day Paul asked us to give him a weekly lecture on superconductivity. We took turns teaching Paul bits of things we had learned from Tinkham. Later in the early 1970s when I worked on Maglev, I got to know Prof. Tinkham quite well because he had once worked on Maglev while still at the UC Berkley.

Starting the summer of 1966, I worked full time on my thesis and by late fall pretty much finished the experiment [4]. Analysis followed. In early April 1967 the thesis was done [5]. My work, experimental and analytical, showed that the magnetization, *initially uniform*, would collapse, when locally disturbed, sequentially along the wire, leaving behind macrovortices — a wavy magnetization: my picture was the exact opposite of theirs [3]. For a full journal paper of the thesis [6], I asked Paul to be a co-author, but he declined, saying he had not contributed enough to the work. I understood his sincerity; we have remained lifelong friends.

When I defended my PhD thesis in April 1967, I was advised by Prof. Herb Woodson, a thesis committee member, to join the Magnet Lab in May rather than wait for my degree in June: "Yuki, you'll continue this work for awhile, either till June as an RA or from May as a research staff. Think of a big difference in pay doing the same work!" I ended my student life on April 30, 1967. In May, I was invited to visit Westinghouse labs in Pittsburgh. There, Mike and I met for the first time since 1961; John Hulm offered me a job. Although several other offers came, I decided to stay at my "home," which, to honor the late Francis Bitter, would be named later that year the Francis Bitter National Magnet Laboratory.

## Conclusion

A few years after my PhD work, the NbZr monofilament wire would become passé, overtaken by the NbTi multifilament wire. *Flux jumping* was

vanquished, and it finally stopped taunting the magnet engineer. Now (2012), after 50 years, I've come full circle: I believe that the *monofilament* wire will be okay for MgB<sub>2</sub>—and other HTS—magnets.

## References

- [1] M.S. Lubell, B.S. Chandrasekhar, and G. T. Mallick, “Degradation and flux jumping in solenoids of heat treated Nb25% Zr wire,” *Appl. Phys. Lett.* **3**, 79 (1963).
- [2] Y. Iwasa and D. Bruce Montgomery, “Flux creep as a dominant source of degradation in superconducting solenoids,” *Appl. Phys. Lett.* **7**, 231 (1965).
- [3] M. S. Walker and J. K. Hulm, “The propagation of persistent current decay in NbZr wires,” *Appl. Phys. Lett.* **7**, 114 (1965).
- [4] Y. Iwasa and J.E.C. Williams, “Direct evidence of persistent current loops in hard superconducting wire,” *Appl. Phys. Lett.* **9**, 391 (1966).
- [5] Y. Iwasa and J.E.C. Williams, “The formation of the macrovortex structure in hard superconductors,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 58 (1967).
- [6] Y. Iwasa and J.E.C. Williams, “Macrovortex structure in hard superconductors,” *J. Appl. Phys.* **39**, 2547 (1968).

## (2) 鉄系超伝導体の薄膜・デバイス

### Thin films and devices of iron-based superconductors

東京工業大学

\*国際超電導産業技術研究センター

平松 秀典, 片瀬 貴義, 石丸 喜康\*

Tokyo Institute of Technology

\*International Superconductivity Technology Center

H. Hiramatsu, T. Katase, and Y. Ishimaru\*

#### 1. はじめに

鉄系超伝導体[1]が報告されてから4年が経過した現在、 $T_c$ の上昇、母物質のバリエーションの増加、物性の理解が想像を超えるスピードで進んできた[2,3]。将来の応用を目指した薄膜研究もそれに伴って進展を続けており、現在では、LaFeAsO系(1111相)、BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>系(122相)、Fe(Se/Te)系(11相)の3種類の物質群の薄膜化が報告されている[4,5]。

我々は、パルスレーザー堆積法(PLD法)で用いるバルク体ターゲットの高品質化に取り組み、かつNd:YAGレーザーを励起光として採用することによって、世界に先駆けて1111相薄膜のエピタキシャル成長に成功した[6]。その後は、化学組成が単純で、1111相に超伝導を発現させる際に加えるフッ素などの高蒸気圧添加物を必要としない122相薄膜に注力している[7]。鉄系超伝導体薄膜の中ではCo添加BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>(Ba122:Co)薄膜の研究が最も進んでおり[8–13]、我々は高品質化したBa122:Co薄膜を用いることによって、超伝導デバイス(ジョセフソン接合[14]や超伝導量子干渉素子(SQUID)[15])の動作に成功し、鉄系超伝導体の優位な粒界特性を明らかにしてきた[16]。

本稿では、これまでの我々の取り組みの中からBa122:Co薄膜を中心に紹介する。

#### 2. 122相薄膜の高品質化

PLD法を用いて鉄系超伝導薄膜を作製する上で、次の2点を改良した。一つは、PLDターゲットの高純度化であり、もう一つはPLD法としては一般的ではないNd:YAGレーザーの第二高調波(波長532 nm)をPLDの励起レーザーとして利用することである[6]。このPLDシステムを適用することによって、 $T_c = 20$  KのCo添加SrFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>(Sr122:Co)超伝導薄膜を得ることに成功した[7]。この薄膜成長法の確立を皮切りに、本来は超伝導を発現しない非ドープSr122薄膜における水誘起超伝導や[17]、同じ122化合物でもSr系よりもBa系の方が大気中でも安定で物性研究やデバイス作製

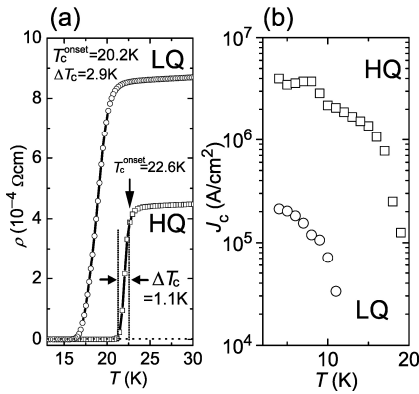


図1. 改善前 (LQ: low quality) と改善後 (HQ: high quality) のBa122:Co薄膜の特性比較 (a)  $\rho-T$  カーブ (b)  $J_c$  の温度依存性

に適していることなどを見いだした[8]。

Sr122:Co膜や初期の頃のBa122:Co膜の $J_c$ は、不純物の析出や粒界形成が弱結合状態につながり、 $0.01 \sim 0.1 \text{ MA/cm}^2$ 程度の値しか得られなかった。そこで、Ba122:Co薄膜をより高品質化するために、更なるPLDターゲットの高純度化と基板温度の面内均質性向上に取り組んだ[12,13]。これらの対策により、図1に示す $\rho-T$ 、 $J_c$ の各特性は格段に向上し、4 Kにおいて $4 \text{ MA/cm}^2$ の $J_c$ を達成した。

興味深いことは、これまでに他のグループから報告されている高 $J_c$ を示すBa122:Co薄膜は[10,11,18]、すべて単結晶基板とBa122:Co薄膜の間に極薄のバッファ層(SrTiO<sub>3</sub>やFe)を必要としていることである。それらのバッファ層はいずれも導電性を有する物質のため、特に輸送特性の評価には支障を来す。しかしながら我々は、上述の一連の改良とNd:YAG PLDを組み合わせることによって、バッファ層を必要とせず、絶縁性酸化物の単結晶基板上にBa122:Co薄膜を直接成長させて現在の特性を実現している。現段階では、その要因は不明であるが、この特徴は、これから述べる粒界ジョセフソン接合の実現や $J_c$ の粒界特性解明のための輸送特性測定に大きく貢献した。

### 3. ジョセフソン接合・SQUID

高品質化に成功したBa122:Co薄膜を傾角30度の[001]-tiltバイクリスタル上に作製し、傾角粒界を介する部分にブリッジ構造(BGB接合)を形成して、その特性を評価した(図2)[14]。

BGB接合を介しない領域では、超伝導-常伝導転移に伴う急激な電圧のとびのみが臨界電流 $I_c=40 \text{ mA}$ で観察されたが、BGB接合では $I_c=1.5 \text{ mA}$ まで抑制され、非線形なRSJ型の電流-電圧特性を示した。この

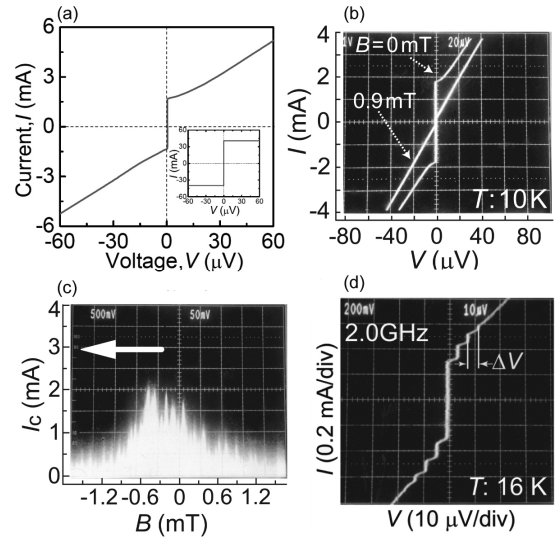


図2. (a) 11 KにおけるBa122:Co BGB接合 ( $\theta_{GB} = 30$ 度) の電流-電圧特性 (挿入図は同じ試料内で傾角粒界を介さない箇所の電流-電圧特性) (b) Ba122:Co BGB接合 ( $\theta_{GB} = 30$ 度) の10 Kにおける磁場中での電流-電圧特性 (c)  $I_c$  の磁場依存性 (図中矢印は磁場印加方向) (d) マイクロ波 (2.0 GHz) 照射下で観察されたシャピロステップ

ことから、BGB接合部分のみがジョセフソン接合として動作していることがわかる。さらに、弱い外部磁場(0.9 mT)を印加すると、 $I_c$ がほぼゼロに抑制され、95%の変調があり、ジョセフソン電流が主であることが確認できた。 $I_c$ の磁場依存性では磁場変調が、またマイクロ波照射下では階段状のシャピロステップがそれぞれ明瞭に観察されたことから、粒界が非超伝導障壁層として働く典型的な粒界ジョセフソン接合として動作していることがわかる。

さらに、この傾角粒界接合形成技術を利用し、粒界ジョセフソン接合の特性をより詳細に評価するため、SQUIDを作製した(図3)[15]。電圧-磁束( $V-\Phi$ )特性では、SQUIDとして典型的な、印加磁場に対して周期的な電圧変調が観察され、最大電圧振幅 $\Delta V$ は $1.4 \mu\text{V}$ であった。また、磁束ノイズ $S_{\Phi}$ の周波数依存性において、20 Hz以上では周波数によらず一定なホワイトノイズを示し、20 Hz以下では周波数の逆数に比例する $1/f$ ノイズを示した。プリアンプノイズの影響を取り除いたノイズレベルは、ホワイトノイズ領域で $7.8 \times 10^{-5} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ 、1 Hzでは $4.2 \times 10^{-4} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であり、YBCOを用いたSQUIDよりも1桁程度高いという結果となった。



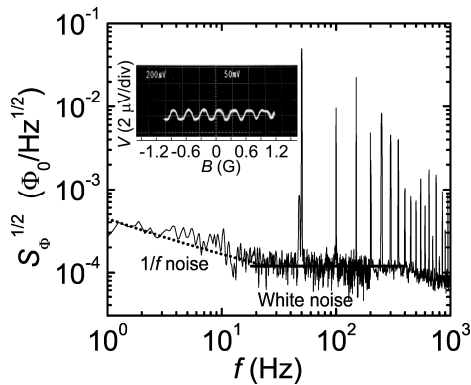


図3. dc SQUIDの14 Kにおける磁束ノイズの周波数依存性 (挿入図は4 Kにおける電圧-磁束特性)

#### 4. 臨界電流の粒界特性と薄膜線材の試作

鉄系超伝導体は、50 Tを超える大きな上部臨界磁場と小さな異方性 ( $\gamma = 1 \sim 2$ : 122相) から、高磁場において高性能な線材への応用が期待できる。そこで我々は、薄膜線材での応用展開を考えた。その際に最も重要な点は、その対象物質の粒界特性である。現在、最も研究が進んでいるYBCOの場合は、その結晶粒界角が3~5度を超えると急激に $J_c$ が減少し始める。そこで、結晶配向度を5度以下に抑制するため、IBAD基板やRABiTSなどの面内の配向制御が必須となっており、高コスト化・製作の長時間化の原因となっている。すなわち、鉄系超伝導体の粒界特性を明らかにすることは急務であった。

MgOとLSATの[001]-tiltバイクリスタル基板上(傾角 $\theta_{GB} = 3 \sim 45$ 度)に、Ba122:Co薄膜を作製した。そして、傾角粒界を介する部分にブリッジ構造を作製し、電流-電圧特性からその傾角粒界における $J_c$ を測定した(図4)。その結果、 $J_c$ は9度の傾角(矢印の位置)まで1 MA/cm<sup>2</sup>以上の高い値を保持することが明らかとなった

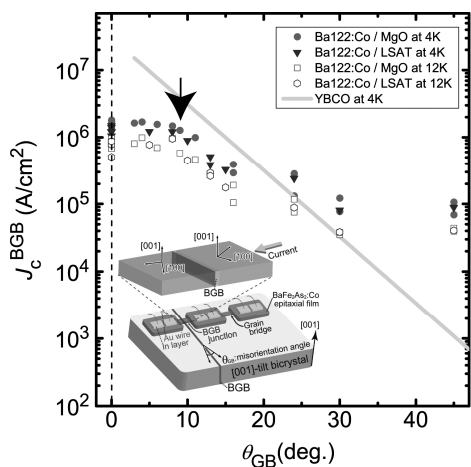


図4. 傾角粒界接合における $J_c$  ( $J_c^{BGB}$ ) の傾角依存性 (挿入図はバイクリスタル基板上に形成したBa122:Co傾角粒界接合)

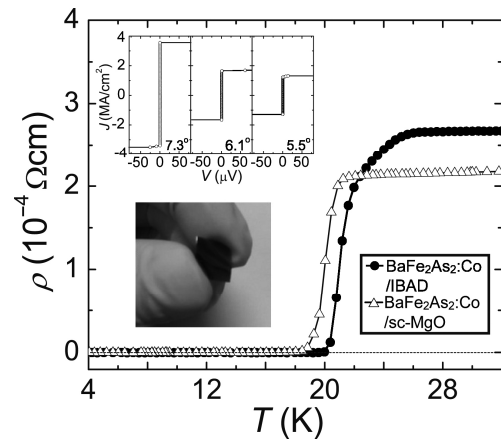


図5.  $\Delta\phi = 5$ 度以上の面内配向度をもつIBAD MgO金属テープ基板上に形成したBa122:Co膜 (●) とMgO単結晶基板上のBa122:Co膜 (△) の $\rho-T$  (挿入図はBa122:Co/IBAD MgOの2 Kにおける電流密度-電圧特性とIBAD MgO基板の面内配向度の関係、および試作した線材を指先で持った場合の写真)

た[16]。この臨界角 $\theta_c = 9$ 度という値は、YBCOの臨界角(3~5度)のほぼ倍と大きい。また、その高い $\theta_{GB}$ 側で $J_c$ が減少する割合にもYBCOと違いがあることがわかる。その結果、 $\theta_{GB} = 30$ 度以上の高傾角粒界においては、4 Kにおいて銅酸化物をしのご $J_c$ を有することがわかった。

鉄系超伝導体は銅酸化物よりも高い $\theta_c$ であることから、薄膜線材にする際には低スペックである9度以下の配向度のフレキシブル金属テープ基板でもよいことを示唆している。そこで、実際に5~7度の面内配向度を有する金属テープ基板(ロスアラモス国立研究所のマティアス博士の研究グループにあえて低スペックのIBAD MgO金属テープ基板の作製を依頼)上に、同じPLD法を用いてBa122:Co薄膜を作製し、その超伝導特性を評価した(図5)。MgO単結晶基板上の試料と比較して転移の温度幅が広いが、その $J_c$ はどれも単結晶基板上の試料と同等の1 MA/cm<sup>2</sup>を超える高い値(最大3.5 MA/cm<sup>2</sup>)を示した。以上の結果により、鉄系超伝導体は、面内配向度が9度以下の基板を使えば、高い $J_c$ を示す薄膜線材が実現可能であることが示唆された[19]。

#### 5. まとめ

鉄系超伝導体Co添加BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の薄膜成長およびデバイス作製に関連したこれまでの我々のグループの取り組みを紹介した。傾角粒界接合を利用したジョセフソン接合やSQUIDとしては、鉄系超伝導体は金属的な性質を有することから、母物質がモット絶縁体の銅系酸化物よりも性能が劣るという結果に至っている。

しかしながら、線材応用を考えると、鉄系超伝導体の高い上部臨界磁場、小さい異方性に加えて、本稿で紹介した高臨界角という一連の特長は非常に魅力的である。現在のところ意図的に磁束ピン止め中心を導入する検討がなされておらず、薄膜成長過程で意図せず形成されているピン止め中心によって高 $J_c$ が実現されている[20]。より実際の応用に近づけるためには、最適な人工ピンの導入により更に高い $J_c$ の達成が期待される。

### 謝辞

本稿は、第16回超伝導科学技術賞を受賞した記念として執筆させていただきました。本研究は、最先端研究開発支援プログラム(FIRST プログラム)の支援により行われ、共同研究者である東京工業大学の細野秀雄 教授、神谷利夫 教授、ならびに国際超電導産業技術研究センターの田辺圭一 副所長、塚本 晃 主管研究員、そして本賞に推薦していただいた方々に心から感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Y. Kamihara *et al.* J. Am. Chem. Soc. **130** (2008) 3296.
- [2] 細野ら: 日本物理学会誌 **64** (2009) 807.
- [3] 前田ら: 固体物理 **46** (2011) 453.
- [4] H. Hiramatsu *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 011011.
- [5] K. Tanabe and H. Hosono, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 010005.
- [6] H. Hiramatsu *et al.* Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 162504.
- [7] H. Hiramatsu *et al.* Appl. Phys. Express **1** (2008) 101702.
- [8] T. Katase *et al.* Solid State Commun. **149** (2009) 2121.
- [9] K. Iida *et al.* Appl. Phys. Lett. **95** (2009) 192501.
- [10] S. Lee *et al.* Nat. Mater. **9** (2010) 397.
- [11] K. Iida *et al.* Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 172507.
- [12] T. Katase *et al.* Appl. Phys. Express **3** (2010) 063101.
- [13] T. Katase *et al.* Supercond. Sci. Technol. (2012) in print.
- [14] T. Katase *et al.* Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 142507.
- [15] T. Katase *et al.* Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 082001.
- [16] T. Katase *et al.* Nat. Commun. **2** (2011) 409.
- [17] H. Hiramatsu *et al.* Phys. Rev. B **80** (2009) 052501.
- [18] D. Rall *et al.* Phys. Rev. B **83** (2011) 134514.
- [19] T. Katase *et al.* Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 242510.
- [20] B. Maiorov *et al.* Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 055007.

### (3) 超伝導複合テープ性能評価における 力学的研究の重要性

#### Significance of mechanical study in performance assessment of superconducting composite tapes

京都大学  
落合 庄治郎  
Kyoto University  
S. Ochiai

#### 1. はじめに

著者は、院生および助手時代に宇宙・航空材料として使用される繊維強化複合材料の変形・破壊の研究に従事していたが、当時の上司であった長村光造先生からお誘いをいただき、1980年代半ばから繊維強化複合材料と同じ構造をしているフィラメント系超伝導線材／テープ材の力学的挙動の研究を始めた。当初は、機能材料といえども力学的安全性・信頼性確保は欠かせないとの観点から、変形・破壊そのものを調べていたが、そのうちに変形・破壊と機能の相関に興味を持ち、残留応力の集積や静的・動的負荷応力による損傷の発生および進展が臨界電流に及ぼす影響、さらに試料ごとの損傷挙動の違いに起因する臨界電流のばらつきを調べるようになった。構造材料としての繊維強化複合材料の研究の経験が機能材料としての超伝導線材の研究に多少なりとも活かされたのは幸運であった。しかしそれ以上に、研究を進められたのは、超伝導の素人であった私に、多くの超伝導研究者から暖かいご助言・ご支援をいただいたおかげである。今回の受賞も皆様のおかげと心より感謝している。

超伝導複合線材では、作製時・使用時の熱履歴により内部で熱応力・残留応力が生じ、巻き取り時に曲げおよび引張応力、使用時に電磁気学的応力を受ける。その結果、応力レベルおよび引き起こされる損傷のレベルに依存して超伝導特性は変化する。超伝導線材の本格的な実用化時代を迎えるにあたって、力学的見地からの超伝導特性評価は欠かせない。本稿では、超伝導複合テープの力学的研究が超伝導性能評価にどのように役立ったかをBi2223複合テープについて2,3の例を挙げて紹介させていただく。

#### 2. Bi2223テープにおける残留ひずみ集積過程およびそれに及ぼすラミネーション効果

Bi2223フィラメント自体の破壊ひずみを $\epsilon_f$ 、複合テープ中のフィラメントの残留ひずみを $\epsilon_r$ とすると、引張りひずみ負荷下での臨界電流の不可逆ひずみは

$\epsilon_f - \epsilon_r$ で表される[1-4]。このうち $\epsilon_f$ の値は残留ひずみの値がわかれば、応力-ひずみ曲線の解析から求められ、第3節で例示するようによそ0.1%程度である[1,2,4,5]。不可逆ひずみ(作製プロセス・仕様により異なるが、およそ0.2~0.5%)に占める残留ひずみの割合は高い。そのため、どのようなプロセスで残留ひずみが集積されていくかを明らかにすることは重要な課題である。X線で温度履歴に沿って順次熱ひずみを求めていくことは原理には可能であるが、複合テープ中に埋め込まれたBi2223フィラメントのひずみ測定は、実験室X線装置では銀による吸収のため実験を精度良く行うことはできない。SPRing8などで放射光実験を行う必要があるが、時間・エネルギー・費用の問題が生じる。できるだけ温度を絞って測定し、熱履歴全体でのひずみ変化を力学計算で求めていくことが必要となる。

著者らは特定の温度での放射光実験結果と応力-ひずみ曲線解析結果を使って、ラミネート複合しない場合(インサートテープ)[2]とした場合(ラミネートテープ)[3]のフィラメントの電流輸送方向の残留ひずみの集積過程の力学的解析法を提案し、図1に示す結果を得た。これにより以下の新知見が得られた。

(1) 銀は降伏応力が低く、また高温ではクリープ変形する。そのため、熱処理温度からの冷却過程において、高温では残留ひずみは集積されない。実質的に残留ひずみを集積し始める温度(図1のT0)を決定する必要がある。このT0を見積もる方法を提案し適用したところ、当該試料では563 Kと熱処理温度(約1100 K)に比して相当に低いことを始めて示すことができた。

(2) インサートテープは、熱処理温度(TH)から室温に冷却され、さらに試料提供元で一旦77 Kに冷却され臨界電流値確認の後、室温に戻され、提供先(著者ら)に送られている。提供先での臨界電流測定では再度77 Kに冷却する。従って、Bi2223は提供先での臨界電流測定時にはABCDEFGHGEの履歴を経てEの残留ひずみになる。一方、ラミネートテープ作製では、まずインサートテープが熱処理温度(TH)から室温に冷却され、ついで、453 K(図1中のT3)に加熱される。その後453 Kでインサートテープとステンレス鋼に引張荷重が負荷され、はんだ接合される。接合後、負荷されていた外部荷重は、インサートテープとステンレス鋼に再配分されて緩和し、外部荷重はゼロになる。この状態ではインサートテープとステンレス鋼の内部荷重は釣り合っている。この力学的プロセスの解析の結果、Bi2223のひずみは接合前の(J)に比して、接合・荷重再配分後(L)は大きな圧縮ひずみになっていることを定量的に示せた。ラミネートされた後、提供元で室温を経て77 Kに冷却され臨界電流確認実験が行われた

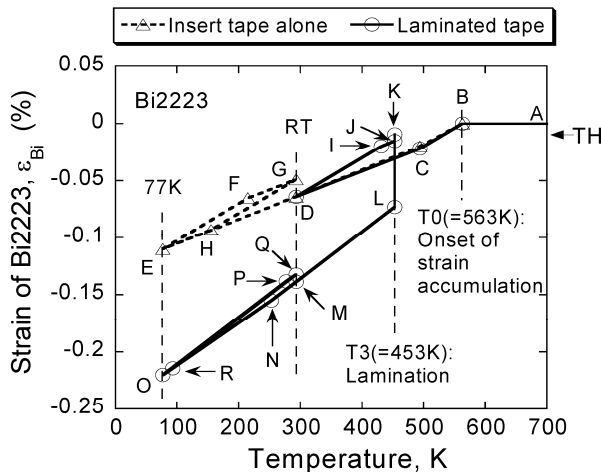


図1. インサートテープおよびラミネートテープ中のBi2223フィラメントのひずみ変化[3]

後、室温に戻されて、提供先に送られている。したがって、提供先での77 Kでの臨界電流測定時にはBi2223はABCDEFGHIJKLMNPOQROの履歴を経て、Oの残留ひずみになっている。77 KではE(インサートテープ)に比して、O(ラミネートテープ)は約倍の圧縮ひずみである。このように、ラミネーションによりBi2223が大きな残留圧縮ひずみを持つ、すなわち可逆ひずみを向上させる過程を明らかにできた。

(3)一旦77 Kに冷却した後、77 Kと室温で熱サイクルをかけると、ひずみは、インサートテープではEFGHE、ラミネートテープではOPQROと変化し、銀の熱サイクル過程での引張・圧縮降伏を反映したヒステレシスを示すが、ヒステレシスはラミネートテープの方がインサートテープに比して小さくなる。このようにラミネーションは、Bi2223の熱ひずみヒステレシスを小さくする効果もあることを明らかにできた。

### 3. Bi2223フィラメントテープの引張応力-ひずみ曲線を利用した臨界電流のひずみ依存性予測

図2(a)に引張応力( $\sigma_T$ )-ひずみ( $\epsilon_T$ )曲線の例を示す。図中の高ひずみ域( $0.25\% < \epsilon_T < 0.3\%$ )で応力がほぼ一定になっている段階は以下の理由で生じる[1,5,6]。フィラメント破壊の初期段階( $\epsilon_T < 0.25\%$ )では、多数のフィラメントのうちの弱いフィラメントがそれぞれの弱い箇所まで離散的に破壊する。この初期段階では、未破壊フィラメントは連続性を保っていること、および破壊したフィラメントの長手方向の破壊箇所間距離も長いことから、フィラメント破壊による応力負担能力の低下より銀と銀合金の加工硬化による応力上昇効果が大きいので、複合テープの応力は負荷ひずみとともに増加する(ただし、後述のように応力-ひずみ曲線の傾きは

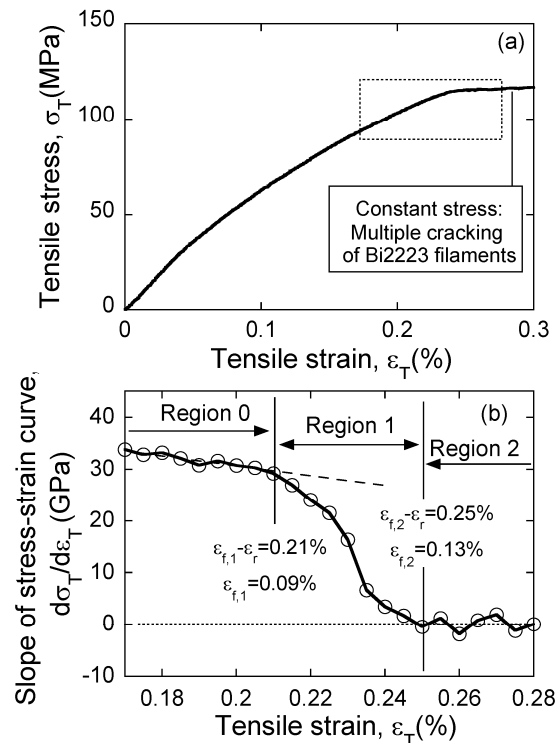


図2 (a)応力-ひずみ曲線、(b)(a)中に点線枠で示された領域の応力-ひずみ曲線の微分[5]

低下する)。このような段階のあと、さらに負荷ひずみを増すと、フィラメント破壊に伴う隣接フィラメントへの応力集中で、隣接フィラメントがほぼ同一断面で次々と破断する現象が生じ、この現象が試料長さ全体にわたって繰り返して生じる(multiple cracking)段階に入る。この段階が図2(a)に示した応力一定領域である。この領域ではフィラメントの集団的破壊による応力負担能力減少と銀・銀合金の加工硬化による荷重負担能力の増加が異なる断面で繰り返して生じるので、図2(a)に示した巨視的な応力-ひずみ曲線では応力がほぼ一定のひずみ域として現れる。この応力一定領域の出現は、この試料だけでなく、仕様や作製会社の異なる多くのBi2223テープ材でも観察されている普遍的な現象である[1,5,6]。

フィラメントの初期破壊は、応力一定域に入る前に生じる。図2(a)に長方形で囲った領域はフィラメント初期破壊とmultiple cracking初期を含む領域である。初期破壊域では、上述のように複合テープの応力は負荷ひずみとともに上昇はするが、応力を負担していたフィラメントの破壊は、破壊しない場合に比して複合テープの荷重負担能力を相対的に減じ、応力-ひずみ曲線の傾き $d\sigma_T/d\epsilon_T$ を低下させる。さらに負荷ひずみが増加し、multiple crackingを開始すると応力は一定なので $d\sigma_T/d\epsilon_T$ はゼロとなる。この現象から、テープ中のフィラメントの破壊開始ひずみ $\epsilon_{f,1} - \epsilon_r$ とmultiple

cracking 開始ひずみ  $\varepsilon_{t,2}-\varepsilon_t$  を同定することができる。図 2(b) に図 2(a) で点線で囲った領域の応力-ひずみ曲線の微分を示す。微分は  $\varepsilon_t=0.21\%$  で低下しており、 $\varepsilon_{t,1}-\varepsilon_t$  は  $0.21\%$  と得られる。また微分は  $\varepsilon_t=0.25\%$  でゼロになっており、 $\varepsilon_{t,1}-\varepsilon_t$  は  $0.25\%$  と得られる。このようにして図 2(b) に示したように無損傷領域 (Region 0)、部分的損傷領域 (Region 1)、甚大損傷領域 (Region 2) が分別できる。この試料の応力-ひずみ曲線測定温度における Bi2223 の残留ひずみ  $\varepsilon_t$  は第 2 節に述べた方法で、 $-0.12\%$  と求めている[4]。したがって  $\varepsilon_{t,1}$  は  $0.09\%$ 、 $\varepsilon_{t,2}$  は  $0.13\%$  となる。

上述のように応力-ひずみ曲線の解析から破壊に関する様々な情報が得られる。これらの結果を使うと、引張りひずみ負荷時の不可逆ひずみや曲げひずみ負荷時の臨界電流の曲げひずみ依存性が予測できる。

(1) 臨界電流測定温度での応力-ひずみ曲線を解析して得た  $\varepsilon_{t,1}-\varepsilon_t$  は、臨界電流の不可逆ひずみそのものである。つまり、応力-ひずみ曲線だけから不可逆ひずみを予測できる。実際に予測値は実験結果と精度良く一致することを確認している[6]。

(2) 曲げひずみ下においてもフィラメント破壊を生じるのは試料長手方向の引張りひずみである[5-9]。曲げ変形下では、Bi2223 フィラメントが銀に埋め込まれた領域 (以下コア (core) と呼ぶ) の引張側最外部でまず損傷が生じ、その後負荷ひずみの増加と共に損傷域が中立軸に向かって進展していく。曲げひずみ下での長手方向の引張りひずみは厚さ方向の位置によって異なり、コアの引張側最外部で最大で中立軸に向かって現象し、中立軸でゼロになる。したがって与えられた曲げ負荷ひずみ下で図 2(b) に示した引張で現われる Region 1, 2, 3 が形成されることになる。このことを利用したコアの形態を組み込んだ力学的計算および Region 1, 2, 3 を特徴付ける臨界電流および  $n$  値から、臨界電流および  $n$  値の曲げひずみ依存性を予測できる。予測結果と実験結果 (12 試料の平均値) は図 3 に示すようにほぼ一致している。なお、図 3 では室温で曲げひずみを与え、77 K で臨界電流や  $n$  値を測定している。冷却すると Bi2223 フィラメントには試料長手方向に圧縮ひずみが負荷されるので、室温で導入された損傷は進展しない。そのため、室温での応力-ひずみ曲線を解析した結果を使っている。

#### 4. まとめ

上記例のように、力学的見地からの超伝導テープ研究により、応力環境下における超伝導特性に関するさまざまな知見が得られる。またこの他にも損傷度合は試料ごとに異なることをベースに解析すると、試料

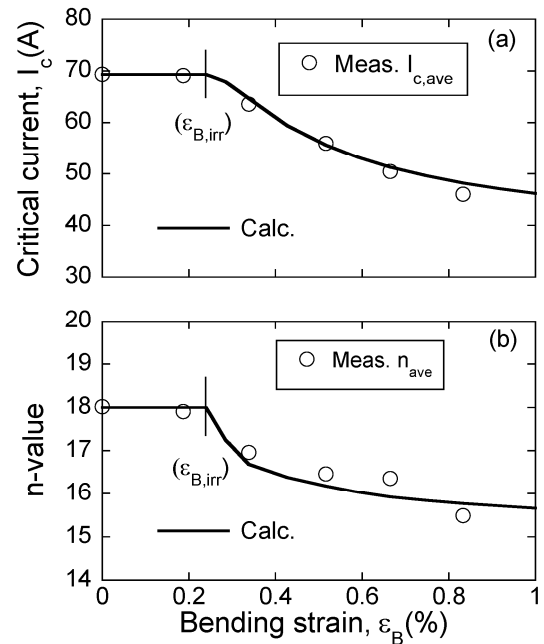


図3 (a) 臨界電流および(b)  $n$  値の測定結果 (丸印) と予測結果 (実線) の比較[5]。  $\varepsilon_{B,irr}$  は曲げひずみ負荷下での臨界電流の不可逆ひずみ。

ごとに異なる不可逆ひずみのばらつきや損傷をうけた場合の臨界電流のばらつきがかなり精度良く記述でき、安全・信頼性評価につながる結果が得られつつある[7-9]。この分野の益々の進展を期待している。

#### 参考文献

- [1] S Ochiai *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **16** (2003) 988.
- [2] S. Ochiai *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **20** (2007) 202.
- [3] S. Ochiai *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 075009.
- [4] S. Ochiai *et al.*, J. Appl. Phys. **103** (2008) 123911.
- [5] S. Ochiai *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 054016.
- [6] S. Ochiai *et al.*, J. Appl. Phys. **107** (2010) 083904.
- [7] S. Ochiai *et al.*, J. Appl. Phys. **105** (2009) 063912.
- [8] S. Ochiai *et al.*, J. Appl. Phys. **106** (2009) 103916.
- [9] S. Ochiai *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 025007.

## (4)手のひらサイズの超伝導バルク磁石の開発

### Development of palmtop size superconducting bulk magnet

日立製作所 日立研究所

松田 和也, 佐保 典英, 西嶋 規世, 田中 弘之

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

K. Matsuda, N. Saho, N. Nishijima and H. Tanaka

(※佐保は2012年2月29日付で退職)

#### 1. はじめに

近年、小域空間に高い磁束密度を発生できる高温超伝導バルク磁石(以下、超伝導バルク磁石と記す)を使用し、この強い磁気力を利用した汚水浄化装置[1]、卓上型NMR(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)[2]、小動物用卓上型MRI(MRI: Magnetic Resonance Imaging System)[3]や磁性幹細胞誘導システム、磁氣的ドラッグ・デリバリー・システム(MDDS: Magnetic Drug Delivery System)[4]等の研究開発が活発に行われている。日立では、先にMDDSおよび磁性幹細胞誘導システム用として磁石本体重量が10 kg未満で、両腕で抱えられるサイズの携帯型高温超伝導バルク磁石システム[5]を開発した。前記磁石システムを利用しているユーザーからは、さらに小型・軽量化を図り、操作性に優れたサイズで、かつ省エネルギーの節電型超伝導磁石の開発に期待が寄せられた。

これらの背景から、筆者らは今回、手のひらに載るサイズで、消費電力を大幅に低減した小型超伝導バルク磁石を開発した。本報告では、まず小型化を実現するための問題点について述べ、これを解決するための方法として超伝導バルク磁石を他の超伝導バルク磁石で着磁する新たな着磁方法[6]を提案し、試作した小型超伝導バルク磁石のフィールド・クール法(以下、FC法と記す)で得られた着磁特性について述べる。

#### 2. 超伝導バルク磁石を小型化する際の問題点

今回、超伝導バルク磁石を携帯型とするために、冷凍機は圧縮機一体型のスターリング式冷凍機を選定した。この冷凍機を用いてFC法で超伝導バルク体を着磁する際、以下の問題がある。すなわち、図1に示すように、FC法では超伝導磁石等の外部磁場発生源による磁場中に超伝導バルク磁石を挿入した後、バルク体を冷却して着磁する。このとき、外部磁場発生源からの漏れ磁場が大きいと、冷凍機に内蔵されているリアピストン型電動圧縮機のピストン移動が拘束され、

運転不可となる。このため、図2に示すように、銅やアルミニウム製の熱伝導体を設けることにより冷凍機とバルク体とを両者を離して接続する。このような構成では熱伝導体部分も低温保持する必要があるため、全体として熱侵入量が増加し、冷却能力の大きい冷凍機が必要となる。これより、超伝導バルク磁石が大型化し、運転時の消費電力も大きくなる。

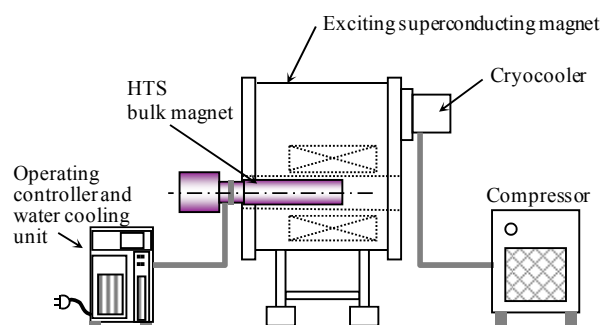


図1. FC法による着磁

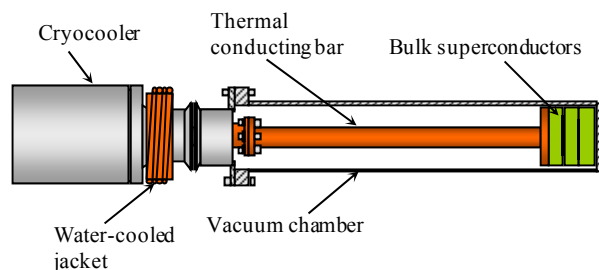


図2. 超伝導バルク磁石の構造

#### 3. 新着磁技術による着磁試験

2章で述べた問題点を解決するため、筆者らは2つの超伝導バルク磁石を用いる新たな着磁技術を検討した。この着磁方法は以下の2ステップで構成される。まず第一ステップとして、図1のように予め励磁した高磁場の超伝導ソレノイド型磁石(以下、磁石Aと記す)で、リング状のバルク体を内蔵した着磁用超伝導バルク磁石(以下、磁石Bと記す)をFC法にて着磁する。バルク体をリング状にすることで、リング中心の高磁場空間を大気中に形成できる。次に第二ステップで、この磁石Bの高磁場大気空間内にて、冷凍機一体型の超小型超伝導バルク磁石(以下、磁石Cと記す)をFC法で高磁場に着磁する。図3にステップ2で着磁するときの磁石Bと磁石Cの位置関係を示す。このように超伝導バルク磁石によりバルク体を着磁する場合、超伝導バルク磁石は距離による磁場の減衰が大きいために、漏れ磁場の小さい外部磁場として利用できる。

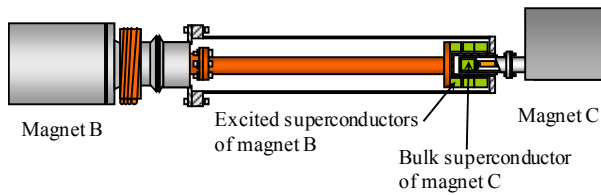


図3. 磁石Bによる磁石Cの着磁構造

この着磁方法を用いた超小型の超伝導バルク磁石を試作した。超伝導バルク体の材質には、これまでに超伝導バルク磁石開発で使用したものと同様のGd系(Gd-Ba-Cu-O)を用いることとした。

リング状バルク体の磁石Bと円柱状バルク体の磁石Cの設計においては、磁石Cの捕捉磁場が大きくなるような最適な寸法の組み合わせを検討した。すなわち、磁石Aのボア径が一定の条件のもとでは、磁石Bのリング内径を小さくすると磁石Bの捕捉磁場は増加するが、磁石Cの外径が小さくなるため磁石Cの捕捉磁場が低下する。逆に磁石Cの外径を大きくすると、磁石Bのリング内径が拡大するため磁石Bの捕捉磁場が低下する。ビーンモデルによる数値解析を行い、磁石Cのバルク体の外径を20 mm、リング状磁石Bのバルク体の内径を35 mmに選定した。

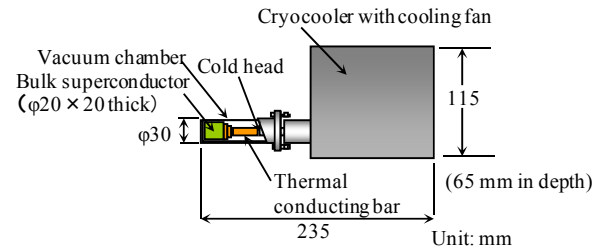
まず、予備実験として、リング状バルク体を備えた磁石Bを5 Tに励磁した磁石Aで着磁した。このときバルク体温度は約38 Kで、常温ボア中央部付近の軸方向磁束密度をホールセンサにて測定したところ、4.9 Tと磁石Aの励磁磁界の98%を捕捉したことを確認した。

磁石Cの冷凍機は、着磁時の磁石Bの漏れ磁場が動作に影響を与えない位置に配置する必要がある。これまでに開発した携帯型超伝導バルク磁石の軸方向磁束密度の実測値から予測し、冷凍機に内蔵されている圧縮機的位置において0.1 T以下の磁束密度になるように磁石Cを設計した。

試作した磁石Cの概略構造を図4に示す。バルク体は外径20 mm、厚さ20 mmで、図示していないが外周にステンレス製の補強リングを有している。使用した冷凍機は圧縮機一体型のスターリング式冷凍機であり、コールドヘッド温度77 Kにおいて、1 Wの冷凍性能を有している。圧縮機の圧縮熱は隣設したファンにより空冷で排熱した。試作した磁石Cのサイズは、全長235 mm、幅65 mm、高さ115 mm、磁石本体の重量は1.8 kgで、図4(b)の概観写真に示すように手のひらサイズの超小型超伝導バルク磁石を具現化し、軽量化により磁石の移動操作性を向上させた。

試作した磁石Cを、磁石Bの4.9 Tの励磁磁界により着磁した。真空容器表面での半径距離と軸方向磁束

密度の測定結果を図5に示す。 $R_s=0$  mmの真空容器表面中央部で最大磁束密度3.15 Tの磁束密度を計測した。また、磁石Cの着磁後の定常冷却状態での消費電力は、空冷ファンの電力を含め23 Wであり3 T級の超伝導磁石を、ノート型パーソナルコンピュータ並みの消費電力で運転維持できることを確認した。



(a) Structure of the trial magnet C



(b) Photograph of the palm magnet C

図4. 超小型超伝導バルク磁石(磁石C)の概略構造

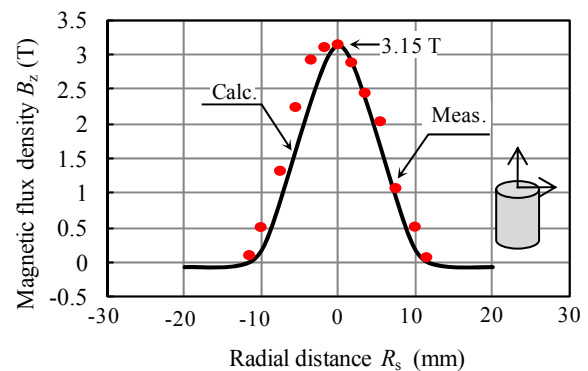


図5. 真空容器表面での磁石Cの軸方向磁束密度分布

#### 4. まとめ

手のひらサイズの超伝導バルク磁石実現のため、着磁用超伝導磁石(磁石A)と着磁用バルク磁石(磁石B)による二段着磁方法を提案し、試作機により着磁特性を評価した。その結果、全長235 mm、幅65 mm、高さ115 mm、磁石本体の重量1.8 kg、消費電力23 Wで、真空容器表面において最大3.15 Tの磁束密度を発生させることが可能な冷凍機一体型超伝導バルク磁石(磁石C)を開発できた。

## 参考文献

- [1] 佐保典英, 水守隆司, 西嶋規世, 磯上尚志, 村上雅人, 富田 優:「超電導バルク磁石を応用した水浄化用磁気分離装置」, 低温工学 **37** (2002) 622-628
- [2] T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Oka and J. Uzawa : “Development of a superconducting magnet for nuclear magnetic resonance using bulk high-temperature superconducting materials,” Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering) **31B** (2007) 65-70
- [3] 仲村高志, 小川恭平, 寺田康彦, 巨瀬勝美, 拝師智之:「EBCO バルク超電導磁石を用いたMR マイクロスコープ」, 第85回2011年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2011) 173
- [4] 村垣善浩, 伊関 洋, 佐保典英, 西嶋茂宏, 武田真一, 佐々木明, 窪田 純, 田畑泰彦, 山本雅哉:「超電導バルク磁石を用いた磁気誘導ドラッグデリバリーシステム(MDDS)の開発」, 第22回日本 DDS 学会プログラム予稿集 **22** (2007) 351
- [5] 佐保典英, 磯上尚志, 西嶋規世, 田中弘之, 窪田 純:「携帯型高温超電導バルク磁石システムの開発」, 低温工学 **46** (2011) 102-110
- [6] 佐保典英, 磯上尚志, 田中弘之:「磁石着磁システムおよび被着磁超電導磁石」, 特許第04512644号, 出願日 2008.1.15

## (5)ニュートリノビームライン超伝導磁石システムの開発と安定運用

### Development and Operation of Superconducting Magnet System for J-PARC Neutrino Beam Line

高エネルギー加速器研究機構

荻津 透, 槇田 康博

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

T. Ogitsu and Y. Makida

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器J-PARC[1]では、次期ニュートリノ振動実験計画(T2K[2])のためのビームライン施設が建設され、運転が始まっている。この計画で一次ビームラインは、メインリングから射出される最高50 GeV(現状は30 GeV)の陽子ビームを曲げ半径約100 mで90度程度曲げることが要求された。これを限られた予算とスケジュールで実現する為に2.6 Tの2極磁場と19 T/mの4極磁場を同時に発生できる超伝導複合磁場磁石(SCFM:図1)を28台用いた超伝導システム[3]を用いたビームラインが採用された。システムは2008年の12月に完成し、2009年6月までビーム運転を含む試運転を行った。このシステムの開発はKEK素粒子原子核研究所から依頼を受けて超伝導・低温工学センター、機械工学センター、そして素粒子原子核研究所低温グループが協同で行った。特にSCFMについては細部にわたるまでの開発をKEKインハウスで行い、実際に実機と同等のプロトタイプ磁石を製作し、その性能を確認した上で量産を請け負ったメーカーに技術供与を行った。本解説ではこの磁石の基本構造、システムの構成、および運転状況について報告する。

#### 2. 超伝導複合磁場磁石[4]

SCFMの基本構造を図1に示す。SCFMの中心は2極/4極複合磁場を発生する、上下鏡対称の単層左右非対称コイル2本(内径173.4 mm)で、SUS316L製のビームチューブを挟むように配置されている。これをガラス繊維強化フェノールプラスチック製のプラスチックカラーを介して、鉄ヨークが挟み込むようにして機械的な支持を与えている。この構造はコイルが左右非対称である以外は、米国BNLで建設されたRHIC加速器の超伝導2極磁石と相似な構造となっていて、経済性を極力追求したものになっている。



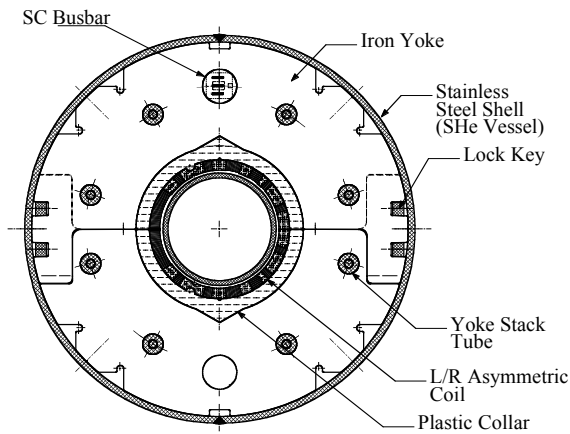


図1. J-PARCニュートリノ用  
複合磁場型超伝導磁石断面

### 3. 超伝導磁石システム

一つのクライオスタット内には、2組のSCFMが2極磁場は同じ向きだが4極磁場は極性が反転する様に設置され、光学的なダブレットが構築される。ビームラインはこのダブレットを14台並べて構成される。ダブレットの間にはインターコネクトと呼ばれる短いクライオスタットがあり、場所によってクエンチ放出弁、ビームモニター、または補正磁石といった個別の機能を持っている。

全てのSCFMは1つの電源(8 kA, 10 V)によって直列に励磁される。SCFMのクエンチ保護は、コールドダイオードによる励磁電流のバイパスと、そのバイパスを補佐するクエンチ保護ヒーターによってなされる。

冷凍機は1.2 kW, 4.5 Kの冷凍パワーを持ち、サブクーラーの超臨界ポンプで圧力0.4 MPa流量300 g/s温度4.5 Kのヘリウムを強制対流させて磁石システムを冷却する。冷凍機と地下トンネルの磁石システムは長さ約100 mのトランスファーラインでつながれている。トランスファーラインは、超伝導ブスバーが設置された超臨界ヘリウムラインとシールド用の中間温度ヘリウムガスラインを内包する4重管になっている[5]。

磁石クエンチ時にはインターコネクトのクエンチリリーフ弁からヘリウムを放出ラインに逃がし圧力上昇を1.4 MPa以下に抑える。放出されたヘリウムは地上部のバッファータンクに回収され、再冷却時に利用される。クエンチリリーフ弁は、本超伝導ビームラインの建設にあたって新規開発されたもので、高い耐放射線性を持つとともに、開閉動作圧力が任意に設定できるようになっている。

### 3. 建設及び運転

設置作業は2007年の夏から始まり、メインリングの試運転を挟み、2期に分けられた工程計画により進め

られ、2008年の12月には終了した。アライメントはトンネル内の基準点を基に設置精度0.1 mmを目標に行われた。図2は2008年夏にアライメントを行っているときのトンネル内での様子である。



図2. トンネル内設置作業

各機器の設置作業が終了した同年12月には、冷凍機単体での性能試験が行われ、仕様性能である冷凍能力1.5 kW/4.5 Kを十分に満たすことが確認された。

超伝導磁石群とトランスファーラインも含めた総合試運転は2009年1月初旬から行われた。超伝導磁石システムの冷却は約10日間で完了した。

冷却終了後は、磁石の各種安全確認を行いながら、励磁電流を徐々にあげていき、30 GeV運転での定格電流である4400 Aを達成した後、4400 Aでの強制クエンチ試験を行った。クエンチ後の冷却は通常のクエンチ(磁石4台のクエンチ)で2時間、磁石全数クエンチで6時間であることが確認された[7]。

磁石システムの試運転が終了するとJ-PARCメインリングから供給される30 GeV、1.8 kJ相当のビームを1発ずつ打ち込んでビームし運転を行った。ビームは1発目で超伝導磁石システムを通過、その後10発の調整でほぼ設計通りの軌道で通る様になった。

ビーム試運転後は、徐々にビームパワーを上げながら物理データ採取のための営業運転を行ってきた。途中、東日本大震災による中断が10ヶ月ほど入ってしまったが、その他は順調に運転が行われてきている。地震で中断するまでのビーム運転時間は約2000時間に達し、この間に超伝導磁石システムのトラブルによる運転停止時間は僅か9.5時間と非常に高い稼働率を誇っている。ビームパワーも2012年6月までに200 kW相当のビーム受け入れに対して問題なく運転できている。

### 5. まとめ

J-PARCニュートリノビームラインの超伝導磁石システムは世界で初めて超伝導複合磁場磁石を採用した

超伝導ビームラインとして2008年末に完成した。2009年からのビーム運転では2011年3月11日の東日本大震災による約10ヶ月の中断を除けば、安定的に運転が行われ、J-PARCでのニュートリノ振動実験に貢献している。

#### 参考文献

- [1] M. Furusaka, et al., “The joint project for high-intensity proton accelerators”, *KEK Report 99-1; JAERI-Tech 99-056; JHF-99-3*, 1999.
- [2] Y. Itow et al., “The JHF-Kamioka neutrino project”, *hep-ex/0106019*.
- [3] T. Ogitsu, et al., “Superconducting Magnet System at the 50 GeV Proton Beam Line for the J-PARC Neutrino Experiment”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **14** (2004) 604-607.
- [4] T. Nakamoto, et al., “Development of Superconducting Combined Function Magnets for the J-PARC Beam Line”, 第3回加速器学会年会プロシーディングス, (2006) 67-69.
- [5] Y. Makida, et al., “Cryogenic system for J-PARC neutrino superconducting magnet beam line – Design, construction and performance test”, *Advances in Cryogenic Engineering. AIP Conference Proceedings*, **1218** (2010) 531-538.
- [6] 木村 誠宏, その他; 技術ノート “超伝導磁石システム用作動圧力可変型クエンチ放出弁の開発”, *低温工学* 第45巻 (2010) 199-203.
- [7] K. Sasaki, et al., “Commissioning Results of Superconducting Magnet System for the Neutrino Beam Line”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **20** (2010) 242-245.

## (6) 直流超伝導送配電システムの研究開発とその役割

### Development of DC Superconducting Power Transmission and Distribution System and Its Role in Society

中部大学・超伝導センター  
山口 作太郎, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男  
Center for Applied Superconductivity and Sustainable Energy Research (CASER),  
Chubu University  
S. Yamaguchi, M. Hamabe, H. Watanabe and  
T. Kawahara

#### 1. はじめに

高温超伝導体 (HTS) が発見される前から金属系超伝導体を利用し、冷媒に液体ヘリウムを利用する超伝導マグネットは加速器や医療用では利用されていた。これは「直流」で利用され、ヘリウムを利用するシステムでも十分に経済性があることや、他技術の置換えが不可能であったためである。このため、金属系材料を使った超伝導ケーブルの開発は直流、交流を問わず複数の国で行われたが、何れも計画が中止された。理由は低温保持の電力が大きいことや資源としてのヘリウムの希少性と高価格のためと思われる。このため、HTSが発見され、液体窒素 (LN<sub>2</sub>) で超伝導が利用できる可能性が高まると、かかる問題が容易に解決されると多くの研究者が考え、多くの国ですぐに超伝導ケーブルの開発計画が再開された。そこでは、冷凍機の消費電力の軽減と、液体窒素利用が前提となった。

HTS発見後の超伝導ケーブルの研究開発は交流ケーブルからはじまった。これはほとんどの送電ケーブルが「交流」であったことが理由である。つまり「交流」ケーブルでないと、使い道が無いか、大きな開発費を投じることができないという側面があった。

#### 2. 中部大学での応用超伝導研究開始について

中部大学では2000年から文部科学省の援助を受けて応用超伝導研究がはじまった。その当時、山口は核融合科学研究所に所属をしていたが、飯吉厚夫学長 (現在は理事長) から、中部大学の計画を手伝うようにといわれて、超伝導送電の研究を行うための予備研究から始めた。計画がスタートした後の2001年からは山口は中部大に移籍し、計画に加わった。この計画では、端末での熱損失低減をペルチェ効果によって実現する「ペルチェ電流リード」の実験から始めることにした。同時に、直流超伝導送配電の検討を本格的に

始めた。直流を選択した理由は下記のようなのである。

- 1) 既に多くの研究者が交流ケーブル研究に関与し、山口等が新たに交流ケーブルを初めて「特徴」を出すのが困難と思われた。
  - 2) 技術上、超伝導ケーブルは原理的に「直流」が得意である。
  - 3) 今後利用が進む再生可能エネルギーの主体となる太陽電池や風力発電は「直流」送電との親和性が高い。
  - 4) 大電力長距離送電は既に「直流」がヨーロッパや中国で広く使われていて、今後も導入が増えることが予定されていた。
  - 5) ハイブリッド車が日本で開発され、交流・直流を変換する電力変換器コストが急激に下がった。
  - 6) 家庭、オフィス及び工場での電力最終需要のほとんどが「直流」である。
- 等である。

そして、2005年から文部科学省の援助を新たに得て、HTSテープ線材を利用した20 mケーブル実験装置を建設した。これは、前年には住友電工のビスマス系線材臨界電流が100 Aを超し、工業利用の可能性が急激に高まったことも技術的な背景となる。

### 3. 20 mケーブル実験装置について

中部大学では2005年から文部科学省の援助を得て、20 m級直流ケーブル実験装置を建設した。図1に装置写真を示す。浜辺は「装置建設」の頃に研究グループに加わった。この装置では次の項目の検討を主に行った。

- 1) ペルチェ電流リードの組み込みによる熱侵入量低減を実験 [1, 2]
  - 2) HTSテープ線材の偏流防止を電流リード抵抗法によって実現し、その効果の計測を行う [2]
  - 3) 断熱2重管にストレート管を利用し、ベローズ管で熱収縮を吸収する [3]
  - 4) ケーブルの臨界電流測定だけでなく、HTSテープ線材単体の臨界電流測定を単独で行うこと [2]
  - 5) ケーブルの熱収縮への対応 [4]
- などである。

以上の目標の設定には、山口が夏にMITに滞在して構想を練った。

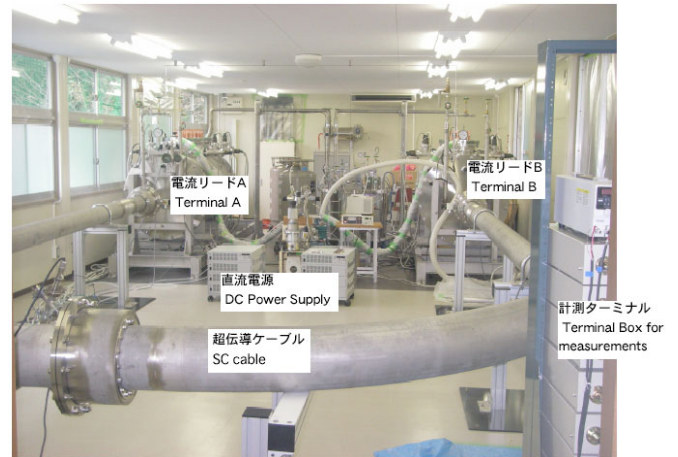


図1. 20 mケーブル実験装置写真 (2006年10月)

これらの実験結果は既に論文発表で説明しているが、今後ケーブルが長くなるにつれて偏流問題[5]が顕在化する可能性があるので、説明を以下に行う。図2はケーブルを構成するHTSテープ線材と末端部の電流リードの素線との接続を模式的に示している。

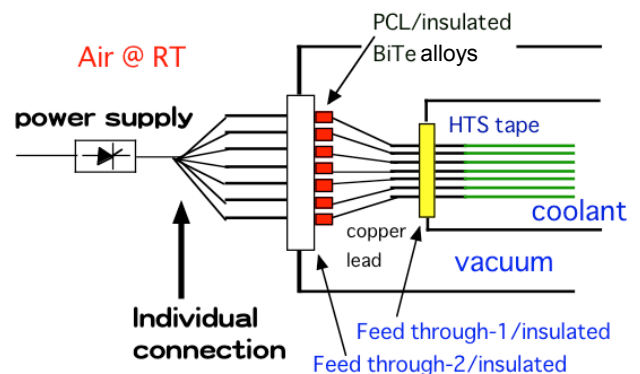


図2. 電流リードでの接続方法

偏流問題とは、多くの並列接続された超伝導素線に流れる電流が均一にはならないことを指す。大電流が流れる素線は常伝導転移しやすく、常伝導になると電流が著しく減少するため、他の素線電流が急激に上昇し、最終的には超伝導マグネット全体がクエンチすることがある。このため、今までに多くの研究が行われてきた。偏流は超伝導素線の電気回路での抵抗が極めて低く、その値のバラツキがあると直流でも発生する。つまり、超伝導素線は電気抵抗がゼロであるが、素線接続部の有限電気抵抗が存在し、それは極めて低い半田などによって接続すると、接続抵抗は1桁以上変動する。一般に接続部の抵抗は低い方が良いので、ある値以下とするのが工業的基準である。しかし、それぞれの素線電流は接続抵抗比で分配されるので10倍以上の違いが生じる。素線電流に大きな差が生じることは、超伝導機器の安定性には好ましくなく、で

きるだけ均一にすることが望ましいが極めて小さな接続抵抗を均一に制御することは困難である。しかし、図2のように電流リード素線とHTS素線をそれぞれ接続すると、HTSテープ線材の接続抵抗に比べて電流リード素線の抵抗は数桁以上大きいので、それぞれの超伝導素線電流は電流リード素線の抵抗比で決まる。このため、偏流が生じない。今後ケーブルが長くなると接続部が増えるため、このような対策は必要不可欠になる。尚、この偏流問題は交流ではより起こりやすい。

#### 4. 200 mケーブル実験装置について

20 mケーブル実験装置では短尺ケーブルで可能な実験を行った。特に、電気的特性は接続部を除けば短尺ケーブルでも十分な場合が多いが、熱・機械的な特性は長尺ケーブルで実験を行う必要がある。幸いナノオプト・エナジー社(藤原洋社長)から中部大学に資金提供があり、200 mケーブル実験装置を建設が可能になった。実験装置写真を図3に示す。

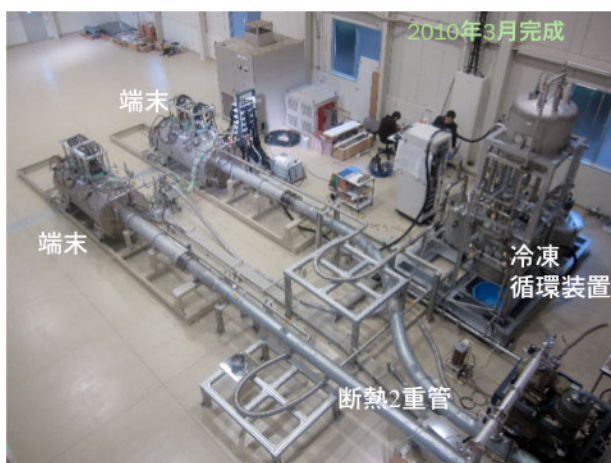


図3. 200 mケーブル実験装置写真

200 mケーブル実験装置では下記の事項が主な検討項目として、研究開発を進めている。

- 1) 超伝導ケーブルの熱収縮の吸収方法 [3]
- 2) 液体窒素循環についてのスケール則 [6]
- 3) 液体窒素循環でのサイホン効果 [7]
- 4) 断熱2重管の真空排気方法と真空保持 [8]
- 5) 断熱2重管での鉄管利用 [3, 9]
- 6) 断熱2重管での熱侵入量の更なる低減 [10]
- 7) 鉄管利用による電力貯蔵 [9]

などである。

ここでは1), 2)の研究課題について簡単に触れる。超伝導ケーブルの熱収縮率は0.3%程度されている。このため、200 mケーブルでは60 cmほど縮む。もし、ケーブルが一様に縮むのであれば大きな問題は生じないであろうが、現状構造では長尺ケーブルが一様に

縮むことは無いであろう。このため、200 mケーブル実験装置では端末クライオスタット方式を可動式にして、ケーブルの熱応力ができるだけ発生しない方式をとった。この課題は今後も改善する必要がある。それは、もし10 kmのケーブルを考えると、熱収縮は30 mにも及び、可動式端末だけでは吸収が不可能となるからである。

次の課題は冷媒循環のための動力に関連する。ケーブルに流すことができる電流は冷媒の温度で決まるため、ケーブルが1桁長くなると、温度上昇を同じにするためには流速は1桁早くなる必要がある。すると、ポンプ圧は同じ長さで2桁上昇する。ケーブルは1桁長くなっているため、最終的にポンプ圧は3桁上昇する。大都市での利用が想定されているとすると、変電所間の距離は数 kmであり、その間にはcooling stationを置くことは超伝導ケーブル利用の経済的メリットをほぼ完全に消し去るため、冷媒循環のための圧力損がどの程度まで低くできるかを実機で確かめる必要がある。このため、流体力学的なスケール則を得て、それを長尺ケーブルに適用し、装置建設の可能性を探ることが重要な課題である。また、スケール則は長さのほぼ3乗に比例するため、一度に長くすることは実験誤差があるため工学的には危険である。したがって、実証を重ねて順次延長することが必要となる。幸い実験データとその解析から、2 km程度までは現存機器で対応できることが分かった。

#### 5. 今後の展望

以上述べたように、2 km程度までなら現状機器で対応できるので、次のステップは、実際の現場で~2 kmの装置を建設し、運転を通じて経験を積みながら開発を続けることが重要であると考えている。日本国内にそのような施設があれば幸せであるが、現時点では不明である。米国ではTres Amigas計画がそれに相当し、~2マイル長の高圧直流送電に超伝導ケーブルを用いた5 GW送電を検討している。これは米国内の3つの電力系統間での調整に用いられる予定であり、超伝導以外の部分では計画はスタートした。また、中国ではアルミ精錬工場での利用が本年には行われると言われている。更に、ロシア、ドイツなどでも同程度の超伝導直流送電のプロジェクトが走ろうとしている。

中部大学・超伝導センターは東京大学・鯉沼秀臣先生のサハラ・ソーラーブリーダー計画(SSB) [11]に参画し、超伝導直流送電を担当している。サハラ砂漠で発電した電力を都市部に長距離送電を行うためである。今までに何度かアルジェリア、チェンジアを訪問し、研究交流を進めると同時に今後の新しい国作りも

議論してきた。ドイツでも DESERTEC と称する、国家レベルのプロジェクトがあり、2050年には~50 GWを北アフリカから導入する計画がある。このような計画では、超伝導を利用して長距離を低損失で送電するだけでなく、現在のインターネットのように双方向送電することがエネルギーセキュリティにとって重要である。そして、超伝導直流送電が世界平和に貢献し、エネルギー問題の解決につながることを筆者等の夢である。

#### 参考文献

- [1] M. Hamabe, A. Sasaki, T. Kasukabe, M. Oue, K. Nakamura, S. Yamaguchi, A. Ninomiya, H. Okumura, K. Kawamura, and I. Aoki: IEEE Trans Appl. Supercond. **16** (2006) 465-468.
- [2] S. Yamaguchi, M. Hamabe, I. Yamamoto, T. Famakinwa, A. Sasaki, A. Iiyoshi, J. Schultz, J. Minervini, T. Hoshino, Y. Ishiguro, and K. Kawamura: J. Appl. Phys.: Conf. Ser. **97** (2008) 012290.
- [3] S. Yamaguchi, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Yu. Ivanov, J. Sun, and A. Iiyoshi: Proc. of ICEC23 and ICMC2010 (2011) Wroclaw, Poland, 1041-1047.
- [4] S. Yamaguchi, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Yu. Ivanov, J. Sun, and A. Iiyoshi: Physica C **471** (2011) 1300-1303.
- [5] S. Yamaguchi, K. Seo, M. Morita, Cryogenics **38** (1998) 875-880.
- [6] S. Yamaguchi, Yu. Ivanov, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, M. Sugino, and H. Yamada: Proc. of SCC 2011 (to be published).
- [7] Yu. V. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, T. Kawahara, and S. Yamaguchi: Physica C **471** (2011) 1308-1312.
- [8] H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi: Proc. of ICEC23 and ICMC2010 (2011) Wroclaw, Poland, 649-652.
- [9] S. Yamaguchi, T. Fujii, M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, and A. Iiyoshi: IEEE Trans Appl. Supercond., **21** (2011) 1046-1049.
- [10] M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Y. Ishiguro, and O. Shinshi: Proc. of ICEC23 and ICMC2010 (2011) Wroclaw, Poland, 639-643.
- [11] <http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/a-green-energy-dream-grows-in-the-sahara>

## <会議報告 1>

### 第3回 超伝導と磁性に関する国際会議報告 Report on the III. International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012)

(独)産業技術総合研究所  
伊豫 彰  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
A. Iyo

イスタンブール(トルコ共和国)にて、2012年4月29日~5月4日の日程で開催されたIII. International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012)に参加した。手元にある小冊子によると、この会議はアンカラ大学を中心に設立された超伝導研究のCOE (CESUR)の主要な活動の一環として、2年毎にトルコ国内で開催されているようである。2008年、2010年に次いで3回目となる今回の会議には、世界各国から約1300名の登録があったと発表された。内訳は、トルコ国内からの登録が約170名と最多であり、日本は、ロシア、アメリカ合衆国、インド、ドイツに次いで6番目に参加者の多い国であった(約65名)。その他、アルジェリアやイランなど周辺諸国からの登録も多かったのが特徴的である。

会議場となったのは、イスタンブール中心部からバスで1時間程の場所(ヨーロッパ側)にある美しい砂浜に面したホテルである。夏はバカンスの客で賑わうのであろうが、会議の期間中は、気温10~25℃程度と涼しく過ごしやすかった。会議初日に、会議の主催者であるアンカラ大学のGencer教授は、会議を紹介する動画などを用いてオープニングの挨拶を行った。その後、銅酸化物超伝導の発見によりノーベル賞を受賞したMüller氏(University of Zurich)による基調講演が行われた。講演に先だって85歳の誕生日をお祝いするケーキが出されるという演出があった(写真)。Müller氏は、銅酸化物超伝導発見の指導原理となった電子-格子相互作用の重要性について述べた。

会議のプログラムは、毎朝の基調講演の後、約7ヶ所の部屋で平行してオーラルセッションが行われ、その後ポスターセッションが行われるという構成であった。約半分が超伝導に関するセッション(残りは磁性など)であり、理論などの基礎から大規模応用まで幅広いテーマが扱われた。また、ジョセフソン効果発見50周年を記念して“50 Years of Josephson Effect”と題するパネルセッションが夜に行われた。以下に、筆者の印象に残った幾つかの講演について報告を行う。

新物質に関して、Johrendt (Ludwig Maximilians Universität München)は、Ptを含む2種類の比較的新しい鉄系超伝導体の組成と超伝導の関係について述べた。より $T_c$ の高い(35 K)相では、FeサイトへのPt置換が少ないほど、 $T_c$ が上昇することを示した。一方、結晶構造の異なる低 $T_c$ 相ではFeサイトへのPtの置換がある(そのために $T_c$ が低い)ものの、CaサイトにLaを少量導入することで、置換が抑制されて $T_c$ が大きく上昇することを示した。Pt置換に関しては、これとは異なる主張もある。今後明らかになることを期待したい。Akimitsu (青山学院大)は、自身が発見した $MgB_2$ の基礎と応用に関するレビューを行った後、近年発見した $W_5Si_3$  ( $T_c = 2.8$  K)、 $YSn_3$  (7 K)、 $W_5SiB_2$  (6 K)、 $KAlSi$  (4 K) など幾つもの新超伝導体の紹介を行った。多くの新物質を発見するのは簡単なことではないはずであり、再び高い $T_c$ の物質が発見されるのではと期待を抱かせる講演であった。最後に、77 Kを超える新超伝導体は酸化物ではないだろうかと予想された。

鉄系超伝導体の応用に関して、Kwok (Argonne National Laboratory) は、 $BaFe_2(As,P)_2$ のピンニング特性が、P置換量に依存して大きく変化すること、イオンなどの照射によって臨界電流密度( $J_c$ )が大きく改善することを示した。また、Shlyk (Institut für Anorganische Chemie) は、 $LiFeAs$ にGaを0.5%添加することで、 $J_c$ が数倍に増加することを報告した。Ma (Chinese Academy of Sciences) は、PIT法による鉄系超伝導体の線材開発の進展について講演を行った。 $(Ba,K)Fe_2As_2$ 系の線材について、4.2 Kで25000 A/cm<sup>2</sup> ( $J_c = 180$  A)と報告した。また、 $SmFeAs(O, F)$ 系についても、約900℃という比較的低温で超伝導線材を作製できることを示した。鉄系については、現状では応用に向けて十分な $J_c$ が出ているとは言えないが、有効なピン留め中心の導入や線材作製プロセスについての研究が進展することで、銅酸化物や $MgB_2$ に並ぶほど線材として魅力的な存在になることを期待したい。

最後に、トルコは景気が比較的良好なことに加え、欧州連合(EU)に加盟したいという政府の思惑もあり、このような国際会議が多く開催されているとある参加者から聞いた。実際に、イスタンブール中心部からホテルに向かう途中のバスの車窓から、ショッピングモールなどの建設中の幾つもの大型施設が見えた。トルコが急速に発展しているという印象を受けた。トルコ料理は、世界三大料理の一つであると出発前に聞いていたが、ホテルのバイキング形式の食事は美味しかったものの、もう少しバリエーションが豊富であればなお良かった。この会議が今後開催されるかどうか未確認であるが、

開催されるならトルコ国内で場所を変えて行われるはずである。トルコはヨーロッパとアジアの境界に位置するため、地域によって大きく雰囲気があると聞いた。美味しい食べ物も沢山有るはずである。縁があれば、いつかまた参加してみたい。



(写真) ノーベル賞受賞者Müller氏(写真に向かって右から2番目)の85歳の誕生日を祝ってケーキが用意された。右端は主催者であるアンカラ大学のGencer教授。

## <会議報告 2>

### 第24回国際低温工学会議 — 2012年国際低温材料会議報告

#### Report on the 24<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic Materials Conference

現地実行委員会/九州大学  
船木和夫

Local Steering Committee/Kyushu University  
K. Funaki

本合同国際会議の一翼である国際低温工学会議は、欧州とアジアに立脚した低温工学・超電導応用分野を代表する会議であり、米国の低温工学会議CECと相補い、隔年に開催され、毎回、20か国以上から300-400人規模の専門家が参加しています。第1回が1967年に京都で開催されて以来、日本での開催は、第5回(京都)、第9回(神戸)、第16回(北九州)を経て、今回のICEC24-ICMC2012は5回目の開催となっており、開催国の中で最多の実績をもつことになりました。また、2006年の第21回からは国際低温材料会議との合同開催が実現して、関連分野では、もっとも広範囲の学術分野をカバーする国際会議となっています。

今回の合同国際会議は、5月14日から18日までの5

日間、福岡市の福岡国際会議場にて、低温工学・超電導学会主催で開催されました。会議本体は15日から17日の3日間で、14日は若い研究者・技術者・学生を対象にした関連研究開発の基礎講座(ショートコース)が開講され、18日は関連施設の見学会が実施されました。また、本会議開催中は、関連企業・研究施設等の製品や研究成果紹介のための展示会が併設され、学会と産業界との国際的なコミュニケーションを深める機会も提供されました。会議場は、福岡の中心街からほんの少し距離をおいた海浜地区にあり、会議場最上階の5階ロビーからは博多湾が一望できるなど、落ちついた雰囲気での会議が行われたのではないかと思います。

参加者は562名(日本338名、中国49名、フランス27名、ドイツ26名など、23か国)、発表は453件(基調講演6件、口頭発表110件、ポスター発表337件)で、このうちICEC関連71%、ICMC関連29%でした。参加者数が従来の1.5倍程度にまで増えたのは、1つには春の低温工学・超電導学会を中止することでこの国際会議に注力することができたこと、もう1つは、欧州とアジアの各国の国際委員・関係者を中心とした結束力で大震災や円高を物ともせず日本での開催を支えていただいたことによります。このことは、会議に併設された展示会への参加が47ブースに達したことからも伺えます。ただ、論文投稿は、234件となっており、発表件数の52%程度に留まっていることは少し残念ではありますが、最近の国際会議での傾向になっているようです。

基調講演は1000人収容の大ホールで、口頭発表は大ホールを含む4会場で、ポスター発表は展示と同室で行われました。基調講演の概要を次に示します。

- 1) New Maglev Transportation in Japan: E. Masada (The University of Tokyo) 日本における磁気浮上列車の開発の歴史と、東京-名古屋間及び東京-大阪間の営業運転に向けての展開などが紹介された。
- 2) Topics of Superconductors in Japan since 3.11 Fukushima: K. Kitazawa (Japan Science and Technology Agency) 昨年3月11日の大震災・津波による日本のエネルギー政策の転換の可能性や新エネルギー政策と超電導応用との関連などが議論された。
- 3) Challenges for Cryogenics in the Nuclear Fusion Quest: the ITER Cryogenic System: L. Serio (ITER Organization) 南フランスCadaracheで製作段階に入るITERについて、コイルや冷却系などの課題など超電導応用技術の最先端の報告があった。

4) Conductors for Very High Field Magnets: D.C. Larbalestier (NHFML, Florida State University) 高磁界用導体の視点でHTS, Fe系への期待が語られた。

5) Low Temperature Cooling for Space Missions: from Mechanical Coolers to Sub-Kelvin Cooling: P. Shirron (NASA/Goddard Space Flight Center) 宇宙空間での冷凍技術について、NASAを中心として幅広い技術動向が紹介された。

6) Mendelssohn Award Lecture: From Early Superconducting Magnets to M. R. I. : Sir M. Wood

15日の午前中の基調講演の後のパラレルセッションの1つで、前回のWroclawでの会議の直後に亡くなられたKlipping夫妻を追悼するKlipping Memorialのセッションが設けられ、ご夫妻に所縁のある方々が、ご夫妻のICECへの貢献・業績などを回想されました。

17日のClosing Ceremonyにおいて、低温工学・超電導学会及び会議両議長よりそれぞれ優良ポスター賞が5名の若手研究者・学生に授与された。本会議では、初めての試みでした。

投稿論文は、Local Scientific Committeeによる査読を経てプロシーディングに掲載されます。

今回のICEC25-ICEC2014は、2年後にオランダのTwente大学で開催される予定です。



基調講演をされる正田先生(左上)と北澤先生(左下)、Mendelssohn Awardを受賞されたSir M. Wood(右)



大ホールでの参加者の皆さん

(1) 東京工業大学 フロンティア研究機構&応用セラミックス研究所

細野・神谷・平松研究室

Tokyo Institute of Technology

Hosono・Kamiya・Hiramatsu Laboratory

(1) 研究室の概略

東工大では、専任講師以上の教員は独立の研究室をもち、必要に応じ協力して研究室運営を行うシステムをとっています。本研究グループは、細野秀雄(フロンティア研究機構&応用セラミックス研究所)、神谷利夫(応セラ研)、平松秀典(応セラ研)の3名の教員が一緒になって研究を進めています。研究テーマは、固体(主に酸化物)中の電子を活かした新機能の開拓であり、独自の視点とアプローチができれば、光・電子・化学機能など出口は気にしていません。

(2) これまでの研究

●酸化物でシリコンを凌ぐ半導体デバイスを実現する。

私たちは、透明酸化物半導体(Transparent Oxide Semiconductor: TOS)という新しい研究領域を開拓してきたパイオニアです。アモルファスTOSの一つであるIn-Ga-Zn-O(IGZO)で、これまで使われてきたアモルファスシリコンの20倍の性能をもつ薄膜トランジスタを2004年に報告しました。アモルファスAOSの提案(1995)、物質設計指針の提示(1996)と実証(2002)から高性能TFTの実現まで、研究室のみでルートを開拓してきました。そして、遂に今年からIGZO-TFTで駆動する高解像ディスプレイが新型 iPad に搭載され、この秋に発売予定の55インチの有機EL-TVの駆動にも採用されそうです(図1)。これは当研究室が世界に誇れる文字どおり目に見える成果です。

●物質が持つ特有の結晶構造を利用して新しい機能を創る。

層状構造を持つ混合アニオン化合物で、室温励起子発光ダイオードや新しい鉄を含む高温超伝導材料などを開拓しました。特に、鉄系超伝導体は、現在銅酸化物に次ぐ高い転移温度を有し、当研究室は発見した本家として、現在世界中で激しい競争の中、さらなる超伝導新物質を求めて、探索し続けています。また、0.4 nmの大きさのかご構造からできている結晶C12A7をベースに、新しい透明導電膜、高輝度電子放出源、有機発光TV用高性能電極、反応触媒、超伝導などの機能を開拓しました。

●材料研究の新しい潮流「ユビキタス元素戦略」

今までは希少金属を使ってしか実現できていなかった機能を、CaやAlなどの豊富で無害な元素だけを使って実現しようとする「ユビキタス元素戦略」を提唱しています。これは、政府の科学政策の大きな柱の一つとなり、2008年から新しい国家プロジェクトを始めました。これまで開拓してきたC12A7や深紫外ファイバーはそのもっとも成功しているユビキタス材料の例です。

(3) 超伝導関係の最近の成果

(a) 鉄オキシニクタイト系の新しい相

F<sup>-</sup>の代りにH<sup>-</sup>をドーパントに用いることで、電子ドーピングの程度をこれまでの2倍以上に拡大出来ました。その結果、LaFeAsO<sub>1-x</sub>H<sub>x</sub>系のように、これまで見出されていたドームはサブなもので、メインはより高い電子ドーブ側に存在することがわかりました。メインのドームの存在は、これまでのスピン揺らぎに基づくフェルミ面のネスティング機構では説明が困難で、Feの3つの軌道の縮退が関係することを報告しています。

(b) BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>Coの高J<sub>c</sub>保つ粒界臨界角の決定とフレキシブル金属テープへの成膜

双晶基板を用いた実験から臨界角がYBCO系の約2倍であることを見出しました。

(c) 非平衡 Ba<sub>1-x</sub>RE<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>相(RE:希土類)のエピ膜による相図

上記の系はバルクでは合成できないが、エピ成長によってこれを安定化し、T<sub>c</sub>のドームはFeサイトのCo置換による電子ドーブの場合と殆ど一致することを発見しました(1111系では大きな差)。



#### (d) Co系超伝導体 $\text{RECo}_2\text{B}_2$ の発見

122構造をもつ上記物質でCoサイトのFe置換でバルク超伝導が発現しました。これによって、Fe、Co、Niという3つの代表的磁性元素のバルク超伝導体が122構造で勢揃いしたことになります。

#### (4) 研究室のホームページ

<http://www.msl.titech.ac.jp/~hosono/>

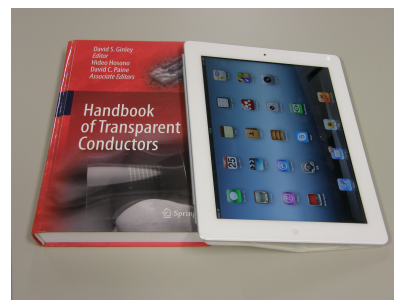


図1. 新型iPad (IGZO-TFT駆動) と透明酸化化物導電体の成著

---

## (2) J-PARC センター 低温セクション J-PARC Center Cryogenics Section

---

### 1) セクションの概要

J-PARCセンター大強度陽子加速器研究施設 J-PARCを運用するためにJAEAとKEKが共同で組織したセンターです。低温セクションは、J-PARCセンターで研究をする内外の研究者に対して極低温冷媒の供給や、極低温超伝導技術を用いた各種実験装置の開発支援を行っています。

### 2) セクションメンバー

セクションはセクションリーダー荻津透とセクションサブリーダー榎田康博、その他約十数名のスタッフによって構成されています。スタッフの約半数はKEK超伝導低温工学センターを併任し、残りの半数はKEK素粒子各物理研究所低温グループを併任しています。

### 3) これまでの成果

低温セクションの最初の大きな仕事はJ-PARCニュートリノビームラインのための長さ約150 mの超伝導磁石システム(図1)の建設で、現在はその運転維持管理も行っています。また大型の超伝導スペクトロメーターSKSのつくばからJ-PARCへの移設及びその後の運転維持も行っています。最近の仕事としては超低速ミュオンビームラインのための超伝導ソレノイドシステムの開発で、長さ7 mの湾曲超伝導ソレノイド(図2)の開発を行いました。このソレノイドは先頭部分が比較的高い放射線にさらされるため耐放射線性の向上が必須でした。



図1. 超伝導ビームライン磁石システム

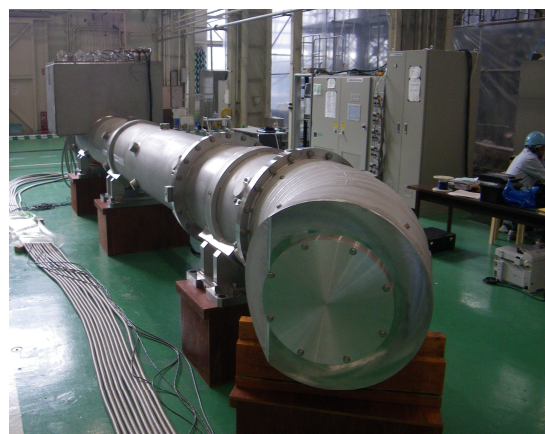


図2. 超伝導湾曲ソレノイド

また先進超伝導材料の研究用に、中性子散乱によって材料の歪み状態を直接測定できるJ-PARCの匠ビームライン用に、極低温で応力をかけた状態で中性子散乱による歪み測定ができる装置の開発及び運営支援も行っています。

#### 4) 今後の計画と研究開発

主に、J-PARCで提案されている新たな物理実験のための超伝導低温機器に関する研究開発を行っています。最大の計画はCOMETと呼ばれる物理実験でミュオンの崩壊過程の精密測定をする実験です。ここでは、ミュオン生成用のターゲットを大口径高磁場(φ1 m, ~5 T)の超伝導ソレノイドで覆ってミュオンを大量に捕獲することを目指しています。このため超伝導ソレノイドは $10^{22}$  n/m<sup>2</sup>レベルの高い耐放射線性が必要となります。このため極低温での中性子照射実験を始め、超伝導極低温機器の耐放射線性に関する研究を精力的に行っています。またg-2と呼ばれる別の実験では、ミュオンの磁気モーメントの精密測定を行うため、MRI技術を応用して直径1 mほどの空間に0.1 ppmレベルの超高精密磁場を実現する超伝導磁石の開発も行っています。

#### 5) 連絡先

〒319-1106

茨城県那珂郡東海村白方 203-1

J-PARCセンター 低温セクション

セクションリーダー: 荻津透(KEK超伝導低温工学センター併任) toru.ogitsu@kek.jp

セクションサブリーダー: 楨田康博(KEK素核研低温グループ併任) yasuihiro.makida@kek.jp

研究室のホームページ: <http://jnu-cryo-dmz1.j-parc.jp/homepage/index.html>

---

### (3) 中部大学 超伝導センター Chubu University Center of Applied Superconductivity and Sustainable Energy Research(CASER)

---

#### (1) 概略

愛知県春日井市の中部大学超伝導センター(CASER)では、21世紀の化石燃料の枯渇対策、及びエネルギーシステム最適化のために、省エネルギー技術の大きな研究開発項目である応用超伝導の研究、特に、直流を用いた超伝導送電システムの研究を行っている。2006年に世界初の高温超伝導体による20 m級直流超伝導ケーブル試験装置(CASER-1)が稼働し、熱侵入が1 W/m以下の超低熱侵入システムの構築が可能になることが示された。これを受けて、株式会社ナノオプト・エナジー社(代表取締役社長 藤原 洋 氏)の資金援助により、200 m級の高温超伝導直流送電実証実験装置-2号機(CASER-2)を建設した。現在までにCASER-2で4回の冷却通電試験を行い、超伝導送電技術の実証的研究開発を行っている。CASERは超伝導技術の早期実用化は直流送電システムと考え、関連技術の研究開発を進めている。これによって、持続的な発展が可能な社会システムの構築を目指している。

#### (2) 組織・構成員(2012年5月現在)

センター長: 山口 作太郎

教員(兼務教員\*): 河原 敏男、浜辺 誠、渡邊 裕文、高橋 道郎\*、服部 敦\*、田中 基彦\*、桃井治郎\*

研究員: 孫 建、山本 則正

### (3) 特徴ある装置

本センターにはCASER-2を用いて主たる実験を行っている。CASER-2では図1のように線路は屋外に、図2に示す端末部が超伝導センター建屋内に設置している。また、個別に冷却技術を開発・評価を行うために、テストスタンドとして、横置き型断熱2重配管熱侵入量測定装置(図3)により各種開発と熱侵入評価を行っている。

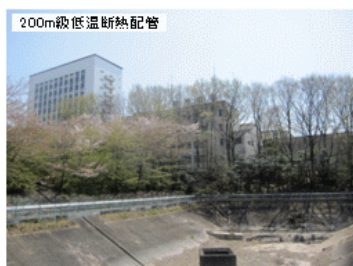


図1. CASER-2の線路

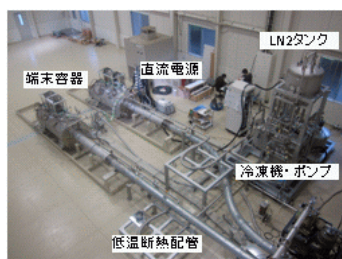


図2. CASER-2の端末・冷却部



図3. 断熱管テストベンチ

### (4) これまでの成果、最近のトピックス

超伝導を用いた直流送配電システムでは、電気抵抗ゼロの超伝導ケーブルを用いるので、大きな課題は少ない消費エネルギーで低温を保つことにある。したがって、第一義的には低温工学関連の研究開発が重要となる。そこで、超伝導センターでは、低熱侵入技術の開発として、ケーブルが敷設されるクライオスタットである断熱2重管システムの低熱侵入化、電力入出力口である端末での低熱侵入化を中心に、寒剤である液体窒素循環ロスの低減などを重点課題として研究開発を行ってきた(図4)。特に長距離では、断熱2重管の低熱侵入化が全体性能を決めるため、メッキ技術等の活用で表面の赤外線反射率を向上させ高性能化を図っている。また、短距離では、端末での低熱侵入化が重要となり、熱電材料を用いた電流リードを開発し、既存の電流リードに比べて半分程度の熱侵入となることを実証している。更に、ケーブル熱収縮を吸収するための新構造やテープ線材の偏流防止方法などについての研究開発を進めてきた。CASER-2ではこれまでに夏と冬の年2回を基本とした4回の冷却試験を順調に行い、第5回の冷却試験を本年夏に行う予定である。

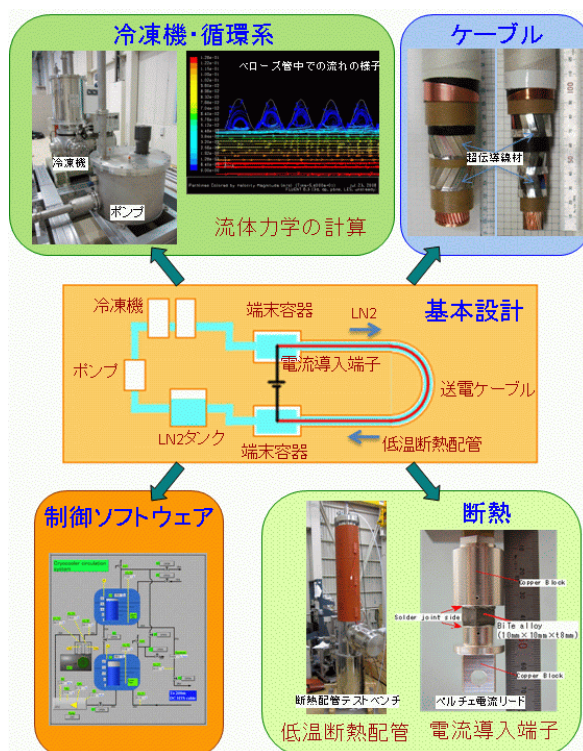


図4. 中部大学における低温工学技術の開発

## (5) 連絡先

中部大学 藤原洋記念超伝導・持続可能エネルギー研究センター

〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

TEL: (0568) 51-9419 FAX: (0568) 51-9413

E-mail: ysl-admin@sclab01.isc.chubu.ac.jp

---

## (4) 株式会社日立製作所 日立研究所 機械研究センター

### 高度設計シミュレーション研究部

Department of Advanced Simulation Research, Mechanical Engineering Research Center  
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

---

## (1) 研究ユニット紹介

株式会社日立製作所・日立研究所では、 $MgB_2$ 線材や磁場応用装置の磁場・熱流体解析を行っています。その中でも機械研究センター・高度設計シミュレーション研究部は、茨城県ひたちなか市に拠点を置き、日立製品の熱流体解析や、CAE技術の研究開発を行っています。私の所属するユニットでは、各種機器の冷却構造開発を担当しており、MRIや加速器等の極低温装置の冷却構造開発、極低温における材料物性値の測定を行っています。最近では、高温超伝導バルク体に着目し、携帯可能な小型の超伝導バルク磁石を開発し、磁気誘導装置等に利用する研究も行っています。

## (2) 特徴ある装置：超小型超伝導バルク磁石

日立ではこれまでに磁氣的ドラッグ・デリバリー・システムや磁性幹細胞誘導の用途で超伝導バルク体を用いた超伝導磁石を開発してきました。図1に示す磁石のマグネット本体の寸法は全長780 mm、幅140 mm、高さ220 mm、重量が9.5 kgで、磁石の真空容器表面45 mmの部分で4 T以上の磁束密度を発生させることができます。この磁石を使用されているお客様からは、更に小領域に磁束を集中させたいという要望がありました。そこで私たちは、一回り小型の超伝導バルク体を用いた磁石開発に取り組み、手のひらサイズの超小型超伝導バルク磁石を開発しました。この磁石は空冷式の冷凍機を内蔵し、全長235 mm、幅65 mm、高さ115 mm、磁石本体の重量は1.8 kgで、真空容器表面において最大3 T以上の磁束密度を発生させることができます。更に空冷式の冷凍機を採用したことにより、消費電力23 Wで動作可能です。



図1. 従来の日立超伝導バルク磁石



図2. 超小型超伝導バルク磁石

## (3) 今後の取り組み

今後は開発した超小型超伝導バルク磁石を応用した磁場応用装置や、超伝導バルク磁石の更なる高性能化

に取り組んでいきます。今回開発した磁石はまだ試作品で販売はしていませんが、磁石の詳細や共同研究の相談等ございましたら、お気軽にご連絡ください。

#### (4) 連絡先、ホームページアドレス

〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口832-2 日立システムプラザ  
(株)日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 高度設計シミュレーション研究部  
担当:松田 和也  
TEL:029-353-3741 E-mail:kazuya.matsuda.wy@hitachi.com  
URL:http://www.hitachi.co.jp/rd/hrl/index.html

---

### (5)九州大学超伝導システム科学研究センター 先端センシングシステム研究室 Division of Advanced Sensing Systems, Research Institute of Superconductor Science and Systems, Kyushu University

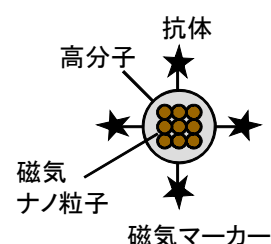
---

#### (1) 研究室スタッフ

教授:円福敬二、助教:吉田敬、技術職員:松尾政晃

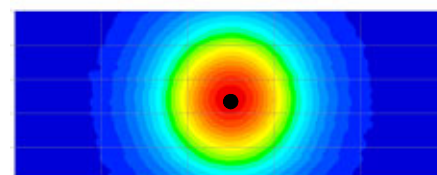
#### (2) 研究室の簡単な紹介

九州大学では学内に超伝導システム科学研究センターを設置し、超伝導の基礎から応用システムに及ぶ幅広い研究開発を行っています。本センターには4つの部門(材料、物性、センシング、エネルギー機器)がありますが、当研究室はその中でSQUID磁気センサを用いた微弱磁界計測システムの開発と先端センシングへの応用を研究しています。最近では、磁気マーカーと高温超伝導SQUIDセンサを組み合わせたバイオセンシングシステムの開発を中心に行っており、体外診断のための磁気的免疫検査装置や体内診断のための磁気マーカーイメージング技術の開発を行っています。



#### (3) 特徴ある装置

SQUIDを用いたバイオセンシングではそれぞれの用途に応じた最適なセンシングシステムの構築が必要となるため、種々の微弱磁界計測システムを開発しています。なお、SQUIDセンサは共同研究先の超電導工学研究所で作製したものを使用しています。



#### (4) これまでの成果、最近のトピックス

図1に磁気マーカーの模式図を示します。磁気ナノ粒子の凝集体を高分子で被覆しその表面に抗体が固定されています。この抗体が特定のバイオ物質に結合し、その結合反応は磁気マーカーからの磁気信号を測定することにより検出します。微量な結合反応を検出するためには微弱な磁界を測定する必要があり、SQUIDセンサを用いることにより高感度な検査が可能となります。この磁気的な検査法を用いて、血液中に含まれる疾患由来のタンパク質や病原菌を検出する磁気的免疫検査装置をこれまで開発して来ました。最近では、この磁気的検査法を体内診断へ展開する研究も開始しています。図1に乳癌のセンチネルリンパ節検査への応用を示します。磁気マーカーを体内に注入し、体内の疾患部位に集積した磁気マーカーの位置と量を体表面の磁界分布から検出

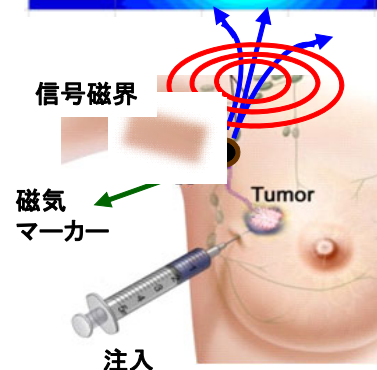


図1. 磁気マーカーとこれを用いた体内診断のための磁気イメージング

する手法で、磁気マーカーイメージングと呼ばれる検査法です。

#### (5) 連絡先、ホームページアドレス等

連絡先: 円福敬二 [enpuku@sc.kyushu-u.ac.jp](mailto:enpuku@sc.kyushu-u.ac.jp)

研究室のホームページアドレス: <http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~enlab/>

---

### (6) 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 藤森研究室 Fujimori Group, Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo

---

#### (1) 研究室スタッフ(H24年6月現在)

教授: 藤森 淳, 助教: 吉田 鉄平

特任研究員: 門野 利治, 吉松 公平

学生 8名, 事務補佐員 1名

#### (2) 研究室紹介

藤森研究室では、放射光分光を用いた超伝導体、磁性体、界面の電子構造の研究を行っています。超伝導体に関しては、主に角度分解光電子分光法 (ARPES) を手段として用い、銅酸化物高温超伝導体および鉄系高温超伝導体のバンド構造、フェルミ面、超伝導ギャップ、擬ギャップを調べています。実験室のヘリウム光源を用いた実験、放射光を光源とする実験 (高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー、スタンフォード放射光施設、広島大学放射光科学研究センター) を行っています。磁性体、界面の研究に関しては、光電子分光の他に、放射光を用いた軟 X 線磁気円二色性などの軟 X 線分光を用いています。

#### (3) これまでの成果, 最近のトピックス

銅酸化物高温超伝導体における超伝導ギャップと擬ギャップの問題を、ARPES を用いて様々な物質で調べてきました。これまで多くの ARPES 測定がなされてきた 2 層系 Bi2212 に加え、1 層系 Bi2201 および LSCO, 3 層系 Bi2223 について系統的な光電子分光測定を行ってきました。蓄積された実験データの解析から、超伝導ギャップと擬ギャップが大きく異なった振る舞いをするを明らかにし、擬ギャップが超伝導とは異なる起源を持つことを示しました。

鉄系高温超伝導体に関しては、その複雑な 3 次元性の強いバンド構造、フェルミ面の同定から超伝導ギャップの異方性の研究まで、ARPES を用いて行っています。最近、超伝導ギャップにノードがあると報告されているリン置換 122 系において、超伝導ギャップに強い異方性があることを ARPES で直接観測することに成功しました。また、鉄原子が他の遷移金属原子で置換され電子がドーピングされた物質の電子構造を ARPES を用いて系統的に調べ、大きな議論となっているリジッド・バンド・モデルの妥当性と限界、置換原子による不純物散乱の効果の大きさを明確にしました。

また最近、磁性体・界面の研究に用いるために、YBCO 線材を用いたベクトル型超伝導マグネットを組み込んだ軟 X 線磁気円二色性測定装置を開発しました。この装置を超伝導体の研究に用いることも計画しています。

#### (4) 連絡先, ホームページアドレス

藤森 淳

E-mail: [fujimori@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:fujimori@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

TEL: 03-5841-4126

<http://wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index.html>

## 研究会の動き

〔平成24年(2012年)4月1日～平成24年(2012年)6月30日〕

### 第38回シンポジウム／第16回超伝導科学技術賞授賞式

日時:平成24年4月17日(火)

場所:タワーホール船堀 小ホール

テーマ:「超伝導2012—超伝導が拓いた強磁場応用—」

出席者数:105名

プログラム:

【座長 熊倉浩明(物質・材料研究機構)】

10:00-10:10 開会の挨拶

下山淳一(超伝導科学技術研究会会長)

10:10-11:00 基調講演「マグネットテクノロジーのこれまでとこれから」 岩佐幸和(M.I.T.)

11:00-11:50 基調講演「マグネット用線材—開発の経緯と展望」

戸叶一正(物質・材料研究機構)

11:50-12:15 超伝導科学技術賞授賞式

【座長 木村昭夫(古河電気工業)】

13:15-13:55 「加速器における超伝導マグネット」

荻津透(高エネルギー加速器研究機構)

13:55-14:35 「ITERにおける超伝導マグネット応用」

小泉徳潔(日本原子力研究開発機構)

【座長 和久田毅(日立製作所)】

15:00-15:40 「CZ法Si結晶成長における磁界印加効果と研究開発の経緯」

干川圭吾(信州大学)

15:40-16:20 「高温超伝導を用いたNMRの開発」

前田秀明(理化学研究所)

16:20-17:00 「MRIと超伝導マグネット」

和田仁(物質・材料研究機構)

17:00-17:10 閉会挨拶

木村茂行(未踏科学技術協会理事長)

### 幹事会

平成24年度1回

日時:平成24年4月24日(火) 13:30～15:30

場所:学術総合センター11階 共用会議室

出席者:幹事9名 事務局1名

### 議事:

- (1) 第78回ワークショップ開催報告
- (2) 第38回シンポジウム開催報告
- (3) 第79回ワークショップについて
- (4) 平成23年度本会活動の内部評価
- (5) 平成23年度収支決算見込みについて
- (6) 平成24年度事業計画及び収支予算について
- (7) 総会について
- (8) FSST NEWSについて
- (9) 新規プロジェクトについて

### 幹事会

平成24年度2回

日時:平成24年6月20日(水)15:30～17:30

場所:学術総合センター11階 共用会議室

出席者:幹事8名 事務局1名

### 議事:

- (1) 第79回ワークショップについて
- (2) 第80回ワークショップについて
- (3) 総会について
- (4) FSST NEWSについて
- (5) 新規プロジェクトについて
- (6) 単行本出版について

## 第1回超伝導科学技術セミナー

～若手技術者向け講習会～

主催 一般社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

\*平成24年度科学技術調査研究助成(新技術振興渡辺記念会)により開催

開催日:平成25年2月22日(金)14:00～2月23日(土)15:00

場所:古河電工健康保険組合鬼怒川荘 TEL 0288-77-0117 〒321-2522 栃木県日光市鬼怒川温泉大原 1060-71

[http://www.furukawadenko-kenpo.com/jigyo/hoyo\\_kinu.html](http://www.furukawadenko-kenpo.com/jigyo/hoyo_kinu.html)

概要:皆様良くご存知の通り、この数年、高温超伝導材料の開発が急速に進み、様々な応用分野に展開されつつあります。同時に次世代の超伝導科学技術を担う若手の研究開発者も増えてきました。本企画は研究開発の一層の促進に寄与することを目指して、若手研究者に超伝導に関わる広く横断的な知識を獲得する機会を用意するものです。また、他社、他研究機関の参加者との交流によって、日本の超伝導研究開発に携わる若手ネットワーク構築のきっかけとなることも狙っています。詳細は追ってご案内いたしますが、多くの皆様の積極的なご参加をお待ちしています。

**超伝導科学技術研究会**  
**平成 23 年度 事業報告**  
**平成 23 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日**

超伝導科学技術研究会が、平成 23 年度(平成 23 年 4 月 1 日から平成 24 年 3 月 31 日まで)に行った諸事業は次のとおりである。

**1. シンポジウムの開催:1 回**

**第37回**

日 時:平成 23 年 6 月 24 日(金) 10:00～17:30

協賛団体:(社)応用物理学会、  
(公社)低温工学・超電導学会、  
(社)日本物理学会、  
(独)科学技術振興機構

場 所:タワーホール船堀 小ホール

テ — マ:超伝導 2011 — 新たな 100 年の幕開け—

参加者数:103 名

**2. 超伝導科学技術賞**

**第15回授賞式**

日 時:平成 23 年 6 月 24 日(金) 12:00～12:30

場 所:タワーホール船堀 小ホール

※第 37 回シンポジウムにて開催

**3. ワークショップの開催:1 回**

**第78回**

日 時:平成 24 年 3 月 13 日(火) 13:30～17:45

共 催:(公社)低温工学・超電導学会

協 賛:(社)電気学会

場 所:東京大学本郷キャンパス武田ホール

テ — マ:再生可能エネルギー導入へ向けた超伝導・  
低温技術

参加者数:88 名

**4. 日米超伝導ワークショップの開催:1 回**

**第15回**

日 時:平成23年10月27日(木)～29日(土)

共 催:住友電気工業(株)

(独)物質・材料研究機構

後 援:文部科学省

場 所:住友クラブ、住友電気工業(株)大阪製作所

参加者数:57 名

**5. FSST NEWSの発行:4回(1回/3ヶ月)**

No.129 (2011年 5月20日)

No.130 (2011年 7月20日)

No.131 (2011年10月20日)

No.132 (2012年 1月25日)

**6. その他**

期間中に会の運営を円滑に展開するため開催された幹事会、賞審査委員会、総会、編集委員会は次のとおりである。

**<幹事会:6回>**

平成 23 年 4 月 13 日(水) 15:30～17:30

ビジネススクール・インターナショナル ルームD

平成 23 年 6 月 27 日(月) 14:50～17:00

学術総合センター11階 共用会議室

平成 23 年 9 月 8 日(木) 14:30～17:00

学術総合センター11階 共用会議室

平成 23 年10月12日(水) 15:00～17:30

学術総合センター11階 共用会議室

平成 23 年12月26日(月) 15:45～17:30

学術総合センター11階 共用会議室

平成 24 年 2 月 8 日(水) 15:40～17:30

学術総合センター11階 共用会議室

**<賞審査委員会:2回>**

平成23年12月26日(月) 13:30～15:30

学術総合センター11階 共用会議室

平成24年 2 月 8 日(水) 13:30～15:30

学術総合センター11階 共用会議室

**<総会:1回>**

平成23年6月27日(月) 14:00～14:40

学術総合センター11階 共用会議室

**<編集委員会:4回>**

平成 23 年 5 月 12 日(木) 15:30～17:50

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成 23 年 7 月 5 日(火) 15:30～17:50

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成 23 年10月11日(火) 15:00～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成 24 年 1 月 12 日(木) 15:00～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

**<会員の状況> (H24. 3. 31 現在)**

団体会員 14社14口 個人会員 14名



**超伝導科学技術研究会**  
**平成 23 年度収支決算書**  
 平成 23 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

(単位:円)

項目		予算額 (X)	決算額 (Y)	決算額－予算額 (Y－X)
収入の部	団体会費	2,800,000	2,800,000	0
	個人会費	140,000	140,000	0
	事業参加費収入	400,000	204,000	△ 196,000
	事業資料代収入	580,000	230,000	△ 350,000
	日米ワークショップ参加費収入	0	645,000	645,000
	日米ワークショップ助成金収入	0	1,000,000	1,000,000
	広告収入	300,000	42,000	△ 258,000
	雑収入	0	237	237
	当期収入合計 (A)	4,220,000	5,061,237	841,237
	前期繰越収支差額	450,000	450,411	411
	収入合計 (B)	4,670,000	5,511,648	841,648
支出の部	シンポジウム・ワークショップ開催費	1,100,000	998,182	△ 101,818
	会議開催費	550,000	611,401	61,401
	印刷出版諸経費	760,000	722,815	△ 37,185
	日米ワークショップ開催費	0	1,650,864	1,650,864
	共通事務費	0	5,375	5,375
	管理費	610,000	512,436	△ 97,564
	基本人件費	1,200,000	1,200,000	0
	予備費	450,000	0	△ 450,000
	当期支出合計 (C)	4,670,000	5,701,073	1,031,073
当期収支差額 (A)－(C)	△ 450,000	△ 639,836	△ 189,836	
次期繰越差額 (B)－(C)	0	△ 189,425	△ 189,425	

平成24年7月19日の総会で承認済み

## 国内超伝導関連会議

### Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会議名	日付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会／秋季	H24.9.11～9.14	愛媛大学城北地区 (愛媛県松山市文京町) 松山大学文京キャンパス (愛媛県松山市文京町)	応用物理学会
日本金属学会／秋期	H24.9.17～19	愛媛大学城北地区 (愛媛県松山市文京町) 松山大学文京キャンパス (愛媛県松山市文京町)	日本金属学会
日本物理学会／秋季	H24.9.18～21	横浜国立大学 (神奈川県横浜市保土ヶ谷区)	日本物理学会
低温工学・超電導学会／秋季	H24.11.7～9	いわて県民情報交流センター (アイーナ) (岩手県盛岡市)	低温工学・超電導学会

## 国際会議及び国外の主要な会議

### Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会議名	日付	開催場所	主催及び問合せ先
M2S2012	2012.7.29～8.3	Washington, D.C. (USA)	www.m2s-2012.org
IUMRS-ICEM2012	2012.9.23～9.28	Yokohama (Japan)	http://iumrs-icem2012.org/
ASC2012	2012.10.7～10.12	Portland, OR (USA)	www.ascinc.org
ISS2012	2012.12.3～12.5	Funabori (Japan)	www.istec.or.jp/ISS/main_J.html

## 超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	独立行政法人 物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主任研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム株式会社 技術開発センター 超伝導線材開発グループ グループ長
荒井 有気	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室 研究員	日高 睦夫	公益財団法人国際超電導産業技術研究 センター 超電導工学研究所 デバイス研究開発部 低温デバイス開発室 室長
伊豫 彰	独立行政法人 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 主任研究員	木村 茂行	一般社団法人未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	一般社団法人未踏科学技術協会 事務局長



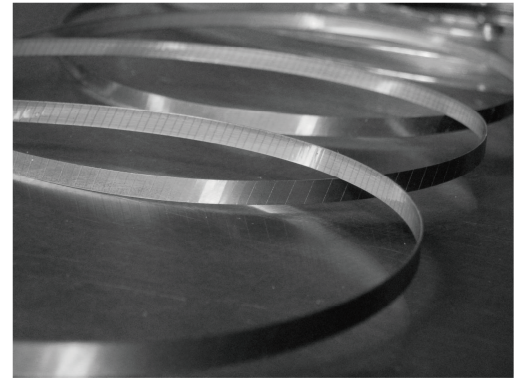
# イットリウム系超電導線材

高温超電導のベストサプライヤー



## <特長>

- 長尺における高い臨界電流値、長手方向に優れた均一性を実現
- 高磁場における高い臨界電流密度、高い機械強度を実現
- 浸漬冷却・伝導冷却用コイル等、高磁場下の応用に適した高性能なコイルアプリケーションが可能
- 電力ケーブルの大容量・大電力化、コンパクト化、低送電損失化、高性能・高効率な超電導ケーブルが実現可能



## <標準仕様\*1>

- 線材幅 (5mm, 10mm)、基板厚さ (75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m) に応じた製品ラインアップ
- 標準臨界電流  $I_c > 500\text{A/cm-w}@77\text{K}, 0\text{T}$ 、単長  $> 300\text{m}$  級にも対応可能

型名	線材幅 <sup>*2</sup> (mm)	線材厚さ			臨界電流値 (A) (@77K, 0T)
		基板厚さ ( $\mu$ m)	安定化層厚さ ( $\mu$ m)	総厚さ (mm) <sup>*2</sup>	
FYSC-SC05	~ 5.15	75	75	~ 0.25	> 250
		100	100	~ 0.3	> 250
FYSC-SC10	~ 10.15	75	75	~ 0.25	> 500
		100	100	~ 0.3	> 500
FYSC-S05	~ 5.15	75	—	~ 0.15	> 250
		100	—	~ 0.2	> 250
FYSC-S10	~ 10.15	75	—	~ 0.15	> 500
		100	—	~ 0.2	> 500

\*1 上記仕様は2012年4月時点のものです。仕様のご確認、ご要求等、何なりとお問い合わせ頂けますようお願い致します。

\*2 線材幅、厚さは絶縁テープを含む平均値となります。

## <線材構造>

絶縁テープ [ポリイミド] 12.5 $\mu$ m $\times$ 2層; 25 $\mu$ m 重ね巻き

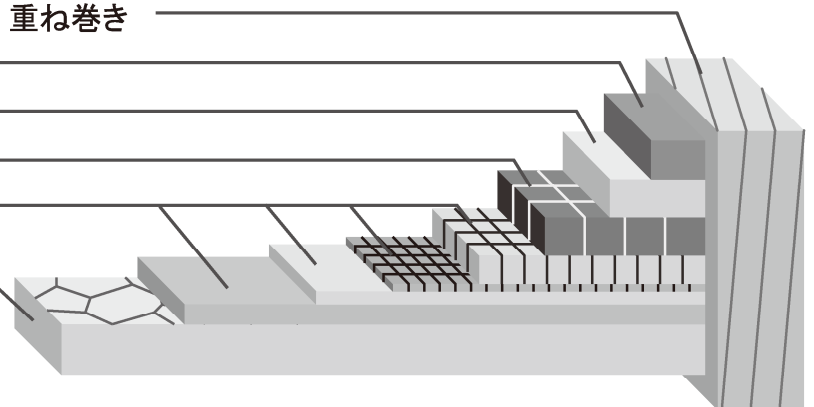
安定化層 [Cu] 75, 100 $\mu$ m

保護層 [Ag] 2 ~ 5 $\mu$ m

超電導層 [GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>] ~ 2 $\mu$ m

中間層 [MgO, etc.] ~ 0.7 $\mu$ m

金属基板 [Hastelloy®] 75, 100 $\mu$ m



お問い合わせ

株式会社フジクラ

新規事業推進センター 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440 TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

E-mail ask-sc@fujikura.co.jp / Web http://www.fujikura.co.jp

Fujikura Superconductor