

**REPORT
OF
MUON SCIENCE LABORATORY REVIEW COMMITTEE**

INSTITUTE OF MATERIAL STRUCTURE SCIENCE
INTER-UNIVERSITY RESEARCH CORPORATION
HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

January 2008

**Muon Science Laboratory
IMSS-KEK**

Issued in February, 2008

Muon Science Laboratory

Institute of Materials Structure Science

High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Phone: +81-(0)29-864-5604

Fax: +81-(0)29-864-3202, 5623

**Report
of
Muon Science Laboratory Review Committee**

**Institute of Material Structure Science
Inter-University Research Corporation
High Energy Accelerator Research Organization**

Meeting on January 17th 2008,

KEK Tsukuba, Japan

Contents

Executive summary:	1
Introduction:	2
Overview of the KEK-MSL group:	3
Physics highlights:	4
Magnetism and High T_c Superconductivity.....	4
Semiconductor.....	5
Muon Catalyzed Fusion.....	6
Industrial applications	7
Technology achievements:	8
MUSE facility at J-PARC:	9
Vision for the future:	10
Conclusions:	11
<i>Appendices</i>	12
A) Charge to the committee:	12
B) Committee membership:	13
C) Agenda:	14

Executive summary:

The KEK-MSL review committee was charged to review the activities of the MSL group in terms of quality and productivity in the context of the closure of the Booster synchrotron in March 2006, the construction of the MUSE facilities at J-PARC and the enhanced participation in overseas facilities during the period 2004-2007. The committee met at KEK on Jan 17th 2008 to hear presentations from the senior staff members and to review the material submitted ahead of the review. The committee thanks the organizers for a very effective organization which helped the committee in its deliberations.

The committee found that the MSL group is scientifically very strong and that, despite taking on an enormous task of constructing the new MUSE facilities at J-PARC, it was able to maintain a scientific program of its own while at the same time, supporting Japanese University groups in accessing foreign facilities.

The program on magnetism and exotic superconductivity continues to be innovative, opening new avenues like in chiral molecular magnets for example, and using the μ SR techniques were most appropriate. The semiconductor work is also world class like the study of novel materials like GaN. The Muon catalyzed fusion program is refining our understanding of the complex atomic physics at play in these reactions. MCF opens a new avenue to energetically economical ways of producing fast (14 MeV) neutrons.

The development of ultra slow muon capability tailored to the pulse structure at J-PARC promises to deliver unprecedented intensities of these muons which will open a new area of studies of thin films, surface and nanostructures in the future.

Overall the group has a key role in nurturing Muon science in Japan and in paving the way to an excellent scientific program at J-PARC. Key to this will be the re-organization of the group to provide University user support at the MUSE facility while delivering on their operational responsibilities at J-PARC and maintaining a science program of their own, a challenge for sure.

The committee is of the opinion that the present group has the strength, talent and motivation to do so.

Introduction:

The director of KEK called for a review of the Muon Science Laboratory (KEK-MSL) asking to evaluate the performance of the laboratory over the last three years since the last scientific review which was conducted in June 2004.

This is part of the regular evaluations of the performance of the laboratory which have been conducted over the 25 years of operation of this institution.

Prof. O. Shimomura, IMSS director, briefed the committee at the beginning of its deliberations. The charge and the composition of the committee are described in appendices A and B.

The review was based upon written material submitted in advance to the committee and on a series of oral presentations at KEK on Jan 17th 2008. The written material included: the KEK-MSL annual reports for the last three years, contributions to the KEK annual report for 2004, 2005, and 2006, a compendium of all the publications from the group for the last three years and a white paper on the research activities of the laboratory. The oral presentations were given in an open session in the morning of Jan 17th 2008 according to the agenda described in appendix C.

The committee met during an in-camera session in the afternoon of January 17th to formulate its findings and recommendations which have been included in this report. A short preview of the recommendations was presented to Prof. O. Shimomura in a close out session at the end of the presentation day.

Overview of the KEK-MSL group:

The group consists of 7 researchers, 2 post-doctoral fellows, 3 graduate students and 4 technical support staff. Their role is to carry out a research program of their own, support a Inter-University program, based at the KEK-MSL facility until 2005 and at overseas facilities, and to build the MUSE facility at J-PARC. The group has been active for 25 years.

Since the previous review in June 2004, a major transition has occurred with the shut down of the Muon beam facilities at the KEK PS and the construction of the new Muon facility at the 3 GeV Rapid cycling synchrotron at J-PARC. This had the consequence that no national facility existed for Japanese muon users after March 2006, and users had to rely exclusively on foreign facilities (RIKEN-RAL, PSI and TRIUMF) with the associate travel burden. However, the Japanese groups and the KEK-MSL group in particular were very successful in getting beamtime at PSI and TRIUMF in a tough competitive environment and made good use of the time available at the RIKEN-RAL facility. It is vitally important that this continues until a viable muon program is in place at J-PARC.

Even-though enormous amount of energy and effort were directed to the construction of the MUSE facility at J-PARC, still a good number of refereed publications were produced: (21, 34 and 26 in 2005, 2006 and 2007 respectively). This level of publications is similar to those of European and North American groups and hardly reflects the reduced time for research of the group due to the J-PARC commitments (a time delay is to be expected for this effect after the shutdown of the KEK-PS).

The group is also characterized by excellent technological skills as demonstrated by the development of experimental equipment (Dai-Omega beamline) and design and development of the beamline elements for MUSE.

As for the quality of the published work, the committee agrees that it was in general of a high caliber and has identified the highlights in the following sections.

Physics highlights:

Magnetism and High- T_c Superconductivity

Recently, many new materials that exhibit exotic superconducting and/or magnetic properties have been synthesized.

The KEK-MSL group obtains these materials and studies the superconducting and magnetic properties by using μ SR technique.

The μ SR is a unique method to study the magnetic chirality in magnets. The group studied the local magnetic structure in an organic chiral magnet and clarified the magnetic chirality in this magnet. This “magnetic chirality problem” has now opened a new physics subfield related with the multiferroics, Berry phase and so on. This experiment is the first case of direct evidence of the right-handed and left-handed chiralities in an organic material.

The cobaltate, $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ attracted much attention because of the possible unconventional superconductivity with a crystal structure similar to that of the high- T_c cuprates. The group found that the zero field muon spin relaxation rate is independent of temperature, indicating that no static magnetic order appears in this compound. Meanwhile, the muon Knight shift at 6T, which is proportional to the local spin susceptibility, shows no obvious reduction below T_c . These results do not exclude a spin triplet superconductivity in this compound.

Li_xCoO_2 is a possible material for a future Li-battery. The Toyota Motor Company group has been working on this material to study the basic physical properties by using μ SR technique, and the group extended the idea to K_xCoO_2 and also to the spinel compound, $\text{Li}[\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x}]\text{O}_4$. These works impact research on re-chargeable batteries. Such studies open to the new interdisciplinary physics between pure and applied physics.

High- T_c superconductivity is one of the most important problems in condensed matter physics. μ SR has provided key information for the superconductivity such as coherence length and penetration depth. In particular, the Koike group studied systematically how Zn and Ni impurities enhance the stripe order in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ and $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$. This study was possible because μ SR can detect the small magnetic moment because of very good sensitivity for the magnetic order.

Semiconductor

The Muonium atom is an isotope of hydrogen. It is very important to get information on the role of hydrogen impurities in semiconductor technology. Only μ SR is able to provide such information. Dr. Shimomura's work of μ SR that revealed the shallow donor states of muonium in ZnO (PRL 89, 255505, 2002) and GaN (PRL 92, 135505, 2004), has confirmed the importance of hydrogen impurities and explained the reason why wide-gap semiconductors are n-type. It is a good contribution of μ SR to the semiconductor society. The proposal of the extension of μ SR studies to wide-gap semiconductors such as TiO_2 or diamond will give more scientific and technological contributions to semiconductor studies. The use of laser techniques particularly well suited to the pulsed nature of the J-PARC muon facility will open up new research area of semiconductors.

Muon Catalyzed Fusion (μ CF)

The program of Muon Catalyzed Fusion (μ CF) is a traditional one for MSL and in the past three years definite progress has been achieved. μ CF is a process that involves three very different fields of physics at different energy scales: Nuclear, particle and molecular physics.

The MSL group was involved in:

- Everyday scientific activity, publication of papers, preparation of theses, etc. using facilities at KEK until March 2006, but more recently at RIKEN-RAL and TRIUMF
- Assembly of the muon channel at J-PARC facility;
- Preparation of proposals for the muon science program at J-PARC;

The KEK-MSL in conjunction with the RIKEN-RAL group has conducted the most comprehensive studies of this process in solid, liquid and gas phases, studying the density dependence of the process including the sticking and the reactivation probabilities in the D-D and D-T systems. More recently the focus of their studies was on the effect of the initial state on the D-D or D-T molecules on the muonic molecule formation. An unique Tritium handling facility has been developed at RIKEN-RAL for the D-T work, while the DC muon beams at TRIUMF were exploited for the D-D work. For those studies specific new techniques were developed to enhance the initial ortho- or para- molecular states of the gas and to monitor it using Raman spectroscopy.

This work has contributed a significant number of publications (amongst them two Physics Letters) in the last two years as well as generated three theses.

Already it is shown that μ CF is one of the ways to produce 14 MeV neutrons effectively, and the technological implications of this possibility should be explored.

Industrial applications

The KEK-MSL group collaborates very well with researchers in universities but also in companies and extended their research field from the basic physics of magnetism and superconductivity to application such as battery materials and nano-particles. Surfaces and interfaces studies will also be included as soon as the ultra-slow-muon source becomes available at J-PARC.

Technology achievements:

Dai Omega and SuperOmega ultra-low-energy Muon Beams

The MSL/IMSS group has devoted considerable efforts in designing intense ultra-low energy muon beams suitable for the study of material surfaces. The basic method is to use axial focusing elements (solenoids) in order to catch surface μ^+ from the production target in very much larger solid angles than conventional beamline elements (quadrupole magnets) can achieve. A first attempt went into the design of the Dai Omega beamline, a Ph.D thesis work by Miyadera. This beamline has an acceptance of up to 1382 msr at the design momentum of 30 MeV/c and would be suitable for high efficiency μ SR experiments. At present there is no production target available where Dai Omega could be implemented, but the basic ideas have been fully exploited in the design of the SuperOmega Muon Beam.

The SuperOmega Muon Beamline will be placed at a backward angle of the J-PARC muon target. It consists of four normal conducting solenoids capturing the surface or cloud muons in a solid angle of about 400 msr. The main transport channel is a superconducting solenoid with curved solenoids at the entrance and the exit to define the accepted momentum band. The expected intensities at the solenoid exit are $4 \times 10^8 \mu^+$ ($1 \times 10^7 \mu^-$) at 1 MW RCS operation. The generation of an ultra low energy μ^+ beam is done as follows: the surface μ^+ are stopped in a hot W foil where they diffuse and form Muonium (Mu) which evaporates into the vacuum, up to 1% of the initial muons. The Mu is then ionized by laser shots and transported to the experimental target. This method allows to define the muon pulse in time and time width by the laser pulse.

The expected performance of this SuperOmega beam is - based on measurements at RIKEN-RAL - $\sim 10^4 \mu^+$ /s. This intensity is sufficient to perform μ^+ SR experiments on material surfaces. A special trick, namely to excite first the Mu with Lyman- α laser light to the 2P state and then ionise with 355 nm light, may boost the ultra-low energy beam to intensities of up to $10^6 \mu^+$ /s which would be worldwide unique and greatly expand the importance of μ^+ SR experiments. Advantages of the proposed beams are e.g.:

- high time resolutions (ns to ps)
- variable implantation depths
- small, adjustable beam sizes

Since the SuperOmega beam opens bright prospects for new and better μ SR experiments, its construction and implementation in phase 2 of the J-PARC project is recommended with the highest priority.

MUSE facility at J-PARC:

The KEK-MSL group has been assigned the task of assembling the MUSE facility at J-PARC which includes the construction of a high intensity production target in the 3 GeV beam from the Rapid Cycling Synchrotron at J-PARC, the construction of the primary proton beamline between the muon target and the neutron source and the development of four high intensity muon channels. At present all the work in the main proton beamline has been completed and is in the stage of commissioning without beam. Later in 2008, the first protons will be delivered to the muon target station.

Of the four muon beamlines planned, only one will be initially operational due to funding limitations. The KEK superconducting solenoid has been refurbished to act as the main element of the muon decay and surface channel at J-PARC and was just transferred to J-PARC for installation as the meeting took place.

During the review period an incredible amount of work has been performed by the MSL team to bring the MUSE facility to the stage that it could be taking beam in September 2008 within the tight specifications imposed by the extremely high radiation environment which will be prevalent when a megawatt proton beam will be used and to minimize the impact of the muon target on the neutron users. This is outstanding by any measure.

Vision for the future:

The future of the muon program in Japan is predicated on the MUSE facility at J-PARC which will ultimately be the best pulsed muon source in the world. The plans call for four muon channels covering the needs of a wide range of users: Decay positive and negative muon beams, positive surface muons and negative cloud muon beams, an ultra slow positive muon beam and a high momentum beam.

They will provide first class facilities for Japanese and foreign muon users. The opportunity to create the world's most intense ultra slow muon beams will position MUSE as the most attractive place for work on surfaces and nanostructures in the future. This must be the highest priority project for the group and for Japanese muon users. As mentioned above, the development of the ultra slow muon beam technology using laser ionization of muonium is based on the pioneering work of the KEK-MSL group first at KEK, then at the RIKEN-RAL facility. It is perfectly matched to the pulse structure of the J-PARC accelerator and will allow unique techniques to be developed using pulsed laser of high power. The review committee is unanimous in recommending that the ultra slow muon facility at J-PARC be the centre piece of the J-PARC MUSE facility and be the top priority for any request for new funding.

Conclusions:

The committee rates the KEK-MSL group as a very good group which combines superb scientific leadership with excellent technical abilities. While devoting a tremendous effort to the construction of the MUSE facilities, the group has managed to support a good user program using facilities at RIKEN-RAL, PSI and TRIUMF, succeeding in getting beam time in very competitive environments.

The publication record over the review period is evaluated as good but must take into account the enormous amount of time needed for the construction of the MUSE facility at J-PARC. Even then the group has made significant scientific impact in several fields. By providing key support for the Inter-University program in the transition phase towards J-PARC operation of MUSE, an active Japanese community has been nurtured and this must continue until MUSE can be fully operational. The KEK-MSL group has a pivotal role to play in the development of the Japanese muon science society and in providing first class instruments for their benefit. The committee also noted that industrial researchers are making strong commitments towards MUSE and that more will be taking advantage of the J-PARC facilities in the future.

The future of Muon science in Japan is directly linked to the KEK-MSL group's ability to maintain a leadership role in this science. The committee has no doubt this can be achieved. The committee recommends that plans be developed to optimize the manpower and funding resources to fully exploit the MUSE facilities at J-PARC

Appendices:

A) Charge to the committee:

Upon the shutdown of the Booster Synchrotron Facility (BSF, on Tsukuba campus) on March 31st 2006, the Director General of High Energy Accelerator Research Organization, Dr. Atsuto Suzuki, delivers the following charge to the External Review Committee of the Muon Science Laboratory at the beginning of its deliberations:

1. Review scientific outcomes achieved at the Muon Science Laboratory of Institute of Materials Structure Science, KEK (KEK-MSL), based on the activities at Tsukuba campus under Inter-University Research Program, and those achieved by KEK-MSL staff using oversea muon facilities. Evaluate quality and productivity in general.
2. Recommend the way how the scientific activities are to be continued after completion of the 1st phase of J-PARC facility construction in FY 2008.

B) Committee membership:

J. Akimitsu	Aoyama Gakuin University
S. Maekawa	Institute for Materials Research, Tohoku University
N. Nishida	Tokyo Institute of Technology
C. Petitjean	PSI, Switzerland
L.I. Ponomarev	Kurchatov Institute, Russia
J.-M. Poutissou	TRIUMF, Canada (Chair)

C) Agenda:

**KEK-MSL REVIEW COMMITTEE
AGENDA**

Date & Time Jan. 17 (Thu)

Place KEK, Bld4, 2nd floor, Conf. Room 1

1. Charge of Review

9:30-9:40 *IMSS Director Osamu Shimomura*

2. Presentation

KEK-MSL Overview

9:40-10:20 K. Nishiyama

Recent high light of Scientific Activity (part I)

10:20-11:00 R. Kadono

Recent high light of Scientific Activity (part II)

11:00-11:20 K. Nishiyama

Report of MUSE construction

11:20-11:40 Y. Miyake

----- *Lunch* -----

3. Closed session

13:00-16:40

4. Summary talk

16:40-17:00 J.-M. Poutissou

ミュオン科学研究施設評価委員会報告

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所

2008年1月17日開催

於 高エネルギー加速器研究機構

目次

重点事項の要約：	1
序：	2
高エ研ミュオン科学研究施設概要：	3
物理の注目すべき成果：	4
磁性と高温超伝導	4
半導体	4
ミュオン触媒核融合	5
産業利用	5
技術的成果：	6
J-PARC のミュオン科学実験施設（ミューズ）：	7
将来展望：	8
結論：	9
A) 評価委員会の任務：	10
B) 委員会構成：	11
C) 会議次第：	12

重要事項の要約：

ミュオン科学研究施設評価委員会に課せられた任務は、平成 18 年 3 月のブースターシンクロトン停止、J-PARC ミュオン実験施設の建設、および海外施設との関係強化といった状況下で、平成 16 年から 19 年にかけてのミュオン施設グループの活動と成果を評価することである。当委員会は平成 20 年 1 月 17 日に会合を持ち、幹部職員の発表を聴聞し事前に提出された資料を調査した。評価委員会は、この周到な準備によってその使命を果たすことができた。

当委員会のみるところ、ミュオン科学研究施設 (MSL) グループは極めて高い研究能力を持ち、J-PARC における新施設 (MUSE) 建設という大事業を遂行しながら自身の研究活動を維持し、かつ大学研究者の海外施設での実験を支援している。

磁性や特異な超伝導の研究課題では創意に満ちた研究が続いており、キラルな分子磁性研究のような新しい分野を開拓するなど、 μ SR が大変有効に活用されている。GaN 等の新物質研究に見られるように、半導体の研究もまた世界的なレベルにある。ミュオン触媒核融合 (μ CF) 研究は、そこで生じている複雑な原子物理の現象に対する理解をより精密なものにしつつある。また μ CF は 14 MeV の速中性子を効率的に生産する新しい手段としての可能性を増しつつある。

J-PARC のパルス構造に最適化された超低速ミュオン発生法の開発によって、従来にない強度の超低速ミュオンが得られ、将来に薄膜、表面、ナノ構造等の新しい研究領域が開かれることが期待される。

総体として、このグループは日本におけるミュオン科学の育成、さらに J-PARC における優れた研究への道を拓く上で鍵となる役割を担っている。ここで重要な点は、J-PARC における施設運営責任を果たし、自らの研究を維持しつつも、MUSE 施設における大学共同利者支援を行なうことができるよう、このグループを再編成することであり、これは確かに困難な課題である。

当委員会の意見は、このグループがこの課題を乗り越える能力、才能、および意欲を持っている、とするものである。

序：

高エネルギー加速器研究機構長は、ミュオン科学研究施設評価を直近の評価（平成16年6月になされた）以降の3年間にわたって施設の研究活動を評価するよう、委員会を招集した。

この評価は、過去25年間における施設の運用に関わる研究組織の業績について、定期的に行なわれてきた評価の一部である。会議の開催にあたって、物質構造科学研究所の下村理所長から委員会への趣旨説明がなされた。委員会の使命と構成は付記A、および付記Bに記されている。

本評価は、前もって委員会に提出された資料と平成20年1月17日に行われた口頭発表に基づいて行われた。資料としては過去3年間のミュオン研究施設年報とKEK年報のミュオン施設関連部分、3年間の全ての学術的出版物の抄録、および研究活動についての白書である。口頭発表は、付記Cに記載された議事次第に基づき平成20年1月17日の午前中に公開で行われた。

1月17日の午後に委員会は非公開の会議で所見（調査結果）と勧告を議論し、その結果がこの報告書に収められている。発表の行われた日の最後に、本勧告の短い概要が下村理所長に報告された。

ミュオン科学研究施設概要：

施設の構成員は7名の研究者、2名の博士研究員、3名の大学院生、4名の技術職員である。この施設構成員の役割は自身の研究を遂行し、平成17年までの自前の施設での大学共同利用およびそれ以降の海外施設での共同利用の支援を行い、J-PARCのミュオン科学実験施設(MUSE: ミューズ)を建設することである。施設は25年にわたって活動してきた。

平成16年6月の直近の評価以降、高エネ機構陽子シンクログロン施設(PS施設)の停止とJ-PARCの3 GeV RCS(ラピッドシンクロトロン)の新ミュオン施設の建設によって、大きな変化が引き起こされた。これにより、平成18年3月以降、日本のミュオン利用者は国内の施設を持たず、完全に外国の施設(理研RAL、ポールシェラー研究所、トライアムフ研究所)に依存し、それに伴う移動の負担を強いられることになった。しかし日本のグループ、特にミュオン施設研究者は熾烈な競争のもとでポールシェラー研究所やトライアムフ研究所のビームタイムをうまく獲得し、理研RALで利用できるビームタイムを活用している。この海外施設での研究がJ-PARCでのミュオン研究が確立するまで継続されることは死活的に重要である。

巨大なエネルギーと努力がJ-PARC ミューズ施設の建設に費やされているにもかかわらず、多くの研究論文が査読を経て発表されている。(平成17年、18年、19年に各21報、34報、26報)。この研究発表の水準はヨーロッパや北米グループと遜色なく、J-PARCへの参画のための研究時間の減少の影響が反映されていないように思える。(高エネ機構PS施設の停止の影響は遅れて現れると予想される。)

このグループは、技術的に優れているという特徴も合わせ持っている。このことは、大オメガビームライン実験装置の開発や、ミューズのビームラインの設計と開発に示されている。

発表論文の質について当委員会は優秀であると認め、最重要な物を次章に挙げる。

物理の注目すべき成果：

磁性と高温超伝導

近年になって特異な超伝導や磁性を示す多くの新物質が合成された。高エネ機構ミュオン科学研究施設グループはこれらの物質を入手し、 μ SR法を用いて超伝導や磁性についての研究を行なっている。 μ SRは磁性体のキラリティーを研究する上で他に例のない手段である。同グループは有機キラル磁性体の局所磁気構造を研究し、この磁性体のキラリティーを明らかにした。この磁氣的キラリティーの問題からマルチフェロイック、ベリー相、等々の新しい物理領域が開れている。この実験は、有機物質における右手系と左手系のキラリティーについて直接的証拠を示した事例である。

コバルト化合物 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ は、高温超伝導銅酸化物と類似の結晶構造にともなう非従来型の超伝導の可能性から興味を持たれてきた。同グループは、ゼロ磁場ミュオンスピン緩和が温度依存性を持たないことからこの化合物では静的な磁気秩序が現れないことを見出した。一方、6テスラの磁場の下でのミュオン・ナイトシフト（局所スピン密度に比例する）は超伝導転移点 (T_c) 以下で減少しない。これらのことから、この化合物はスピン三重項の超伝導である可能性がある。

Li_xCoO_2 は将来のリチウム電池に利用可能な物質である。トヨタ自動車グループは μ SR法を用いてこの物質の基礎的物性を研究しており、この延長線上で K_xCoO_2 やスピネル化合物 $\text{Li}[\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x}]\text{O}_4$ を研究した。これらの研究は二次電池研究に大きな影響を与え、学術研究と応用研究の間を埋める新しい物理を切り拓いている。

高温超伝導は固体物理の最も重要な問題の一つである。 μ SRによって超伝導の鍵となるコヒーレンス長や、磁場侵入長等の情報が得られる。特に小池グループは、亜鉛やニッケルの添加によって $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$ や $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$ のストライプ秩序が強化されることを系統的に研究した。この研究が可能となったのは、磁気秩序に高感度である故に μ SR が微少な磁気能率を検出できることに因っている。

半導体

ミュオニウムは水素の同位体である。半導体技術において水素不純物の役割を知ることは非常に重要である。 μ SRのみによってそのような情報を得ることができる。下村博士の μ SRの仕事によってZnO (PRL 89, 255505, 2002) と GaN (PRL 92, 135505, 2004) 試料中の浅いミュオニウムのドナー状態が明らかになり、この研究によって水素不純物の重要な役割、ギャップの広い半導体がn型を示す理由が説明された。これは μ SRが半導体の分野や業界に役立っていることを示している。 μ SR研究をTiO₂やダイヤモンドなどのギャップの広い半導体に拡張すれば、半導体研究に科学的にも方法論的にも弾みをもたらすだろう。レーザーの使用はJ-PARCミュオン施設のパルスの特徴に合致しており、半導体研究に新たな領域を切り拓くだろう。

ミュオン触媒核融合

ミュオン触媒核融合研究 (μ CF) はミュオン施設で継続して行われており、過去3年間でも確固たる進展があった。 μ CF は3つのエネルギー規模の違う全く異なった物理の分野を含む過程である。即ち原子核物理、粒子物理、分子物理である。

ミュオン科学研究施設グループは次のようなことを行って来た。

- ・平成18年3月までは高エネ機構の施設を用いて、その後は理研 RAL やトライアムフ研究所を用いた日常的な研究、論文執筆、学位論文準備など。

- ・ J-PARC 施設のミュオンチャンネルの建設
- ・ J-PARC におけるミュオン実験提案への準備

高エネ機構ミュオン科学研究施設グループは、理研 RAL グループと共同して固相、液相、気相におけるミュオン触媒核融合過程の包括的な研究、D-D 系、D-T 系における密度依存性、付着率と再活性化率を含めた過程の研究を行った。D-T 実験のために理研 RAL に特別のトリチウム取り扱い施設が開発され、D-D 実験ではトライアムフの直流状ミュオンが用いられた。気体分子のオルソ状態やパラ状態を濃縮する方法とラマン分光法を用いて観測する新しい方法が開発された。

この研究によって過去2年間に多くの研究発表がなされ(2編のフィジックス・レターを含む)また3個の学位が得られた。

またミュオン触媒核融合は有効に 14 MeV の中性子を得る方法の一つであり、技術的可能性を探求しなければならない。

産業利用

高エネ機構ミュオン科学研究施設グループは大学研究者と協力しているが、企業の研究者とも協力し、磁性や超伝導の基礎研究から電池材料やナノ粒子等の応用へも拡張している。表面や界面の研究も、超低速ミュオンが J-PARC で可能になり次第始められるであろう。

技術的成果：

大オメガとスーパーオメガ超低速ミュオンビーム

ミュオン科学研究施設グループは、物質表面研究に適した強度の高い超低速ミュオンビームの設計に努力を傾注している。この方法の基礎は、生成標的からの表面ミュオンを従来の四重極電磁石にくらべ大立体角で集めることのできる軸収束磁石（ソレノイド）を用いることにある。初めての試みとして大オメガビームラインの設計が行われ、宮寺氏の博士論文となった。このビームラインは 30 MeV/c の設計運動量において 1382msr（ミリステラジアン）の収集立体角（アクセプタンス）を持ち、 μ SR 実験を効率的に行うのに適している。現在のところ大オメガを設置することのできる生成標的はないが、この基本的着想はスーパーオメガミュオンビームの設計に生かされなければならない。

スーパーオメガビームは J-PARC ミュオン標的から後方角方向におかれる。4 個の常伝導ソレノイドで構成され、表面ミュオン又はクラウドミュオンを約 400 msr の立体角で取り込む。主な輸送チャンネルは超伝導ソレノイドで、入口と出口は湾曲ソレノイドになっており、取り込みミュオンのモーメントムの幅を決める。ソレノイドの出口の予想強度は RCS が 1 MW 運転の時 μ^+ で 毎秒 4×10^8 個 (μ^- で 1×10^7 個)。超低速ミュオンビームの生成は次の様にして得られる：表面ミュオンは高温タングステン箔に止まり、拡散してミュオニウムとなって表面から真空中に蒸発する。真空中のミュオニウムは最初のミュオンの 1% となる。ミュオニウムはレーザー照射によってイオン化し実験標的まで輸送される。この方法によってミュオンパルスの時間、時間幅はレーザーによって規定される。

スーパーオメガビームの予測性能は、理研 RAL での測定に基づけば毎秒 $\sim 10^4$ 個の μ^+ である。この強度は物質表面で μ^+ SR 実験を行うのに十分である。特殊な方法、即ちミュオニウムをライマン α レーザー光で 2P 状態に励起し 355 nm の光でイオン化することによって、超低速ミュオンビームを毎秒 10^6 個の μ^+ の強度に増強でき、世界にも他に例がなく、 μ^+ SR 実験の重要性が高まるであろう。このビームの長所は以下の諸点である。

- ・高時間分解能（ナノ秒からピコ秒）
- ・可変の打ち込み深さ
- ・微少ビームサイズ

スーパーオメガビームは、新たなよりよい μ SR 実験の明るい将来展望をもたらすのであり、J-PARC 第 2 期計画で最高の優先順位を持って建設・設置されなければならない。

J-PARC のミュオン科学実験施設（ミューズ）：

高エネ機構ミュオン科学研究施設グループは J-PARC のミュオン実験施設の建設を担当する。この建設は RCS からの 3 GeV 陽子ビームをあてる生成標的建設、ミュオン標的—中性子源間の一次陽子ビームライン建設、4 本の高強度ミュオンビームラインの開発を含んでいる。現在陽子ビームラインの建設は完了しビーム前の調整・試験が行われている。平成 20 年の末に最初の陽子ビームがミュオン標的に供給される。

財源が限られているため、計画されている 4 本のビームラインのうちまず 1 本のみが稼働を始める。高エネ機構にある超伝導ソレノイドは J-PARC の崩壊・表面ミュオンチャンネルの基盤機器として改修され、この会議の直前に、設置のためにちょうど輸送されたところであった。この評価委員会開催中にもミュオン科学研究施設グループは膨大な作業を行っており、ミューズ施設を平成 20 年 9 月のビーム受け入れを可能な状態にしようとしている。メガワットの陽子ビームを利用することに伴う高放射線環境とミュオン標的の中性子源に及ぼす影響を最小に留める為の厳しい詳細仕様を満たそうとしている。これは、どのような基準から見ても優れていると言える。

将来展望：

日本におけるミュオン研究の将来は、最終的には世界最良のパルスミュオン源となるであろう J-PARC ミューズ施設にかかっている。利用者の広汎な要求を満たす為に 4 本のミュオンチャンネルが計画されている。即ち正負ミュオンの崩壊ビームライン、正ミュオンの表面ミュオンと負ミュオンのクラウドミュオンを出すビームライン、超低速正ミュオンビームライン、高運動量ビームラインである。

これらのビームラインは、日本はもちろんのこと外国の利用者にとっても一流の施設となるだろう。世界で最も強度の高い超低速ミュオンビームが得られることによって、ミューズは将来、表面やナノ構造の研究にとって最も魅力的な施設となる。この計画がミュオン科学研究施設グループにとっても日本の利用者にとっても最も優先度が高いはずである。前に述べたように、ミュオニウムのレーザーイオン化法は KEK でミュオン科学研究施設グループによって世界に先駆けて行われ、理研 RAL で継続されている。この方法は J-PARC 加速器のパルスの時間構造と完全に適合しており、大強度パルスレーザーを用いる独得な手法を用いることが可能となる。評価委員会は全員一致して、J-PARC の超低速ミュオンがミュオン実験施設の要となり、新たに資金要求する際に最優先とするよう勧める。

結論：

本委員会は、高エネ機構ミュオン科学研究施設グループが非常に優れており、研究においてすばらしいリーダシップを発揮するとともに、高い技術的能力をも兼ね備えていると認めるものである。ミューズ施設の建設にかかる多大な労力にもかかわらず、このグループは理研 RAL、ポールシェラー研究所、トライアムフ研究所の施設を利用した研究支援を怠りなく遂行しており、また厳しい競争の中で自らのチームタイムを獲得している。

評価の対象となっている期間における研究発表は「良」であるが、膨大な時間が J-PARC ミューズ施設建設に必要であることを考慮すべきであろう。それにもかかわらずこのグループはいくつかの分野で科学的に大きな影響のある研究を行った。J-PARC ミューズ施設における運転が始まるまでの過渡期に、大学共同利用を支援することによって活動的な日本人研究者集団が維持されて来たが、ミューズが完全に稼働するまではこの支援が継続されなければならない。

高エネ機構ミュオン科学研究施設グループは、日本のミュオン科学分野の発展、およびそのための一流の施設を提供するために中核的な役割を担っている。委員会の認めるところでは、産業界の研究者もミューズ施設に参加しようとしており、将来 J-PARC 施設を活用しようとしている。

日本におけるミュオン科学の将来は、高エネ機構ミュオン科学研究施設グループがこの分野においてリーダシップを発揮し続けることができるかどうかにかかっている。本委員会はこれが実現されると信じるものである。本委員会は、J-PARC のミューズ施設を最大限活かすために、人員と資金を最適化した計画が立案されることを勧告する。

A) 評価委員会の任務：

平成18年3月31日のブースターシンクロトロン閉鎖(つくば地区のBSF)に際し、高エネルギー加速器研究機構長(鈴木厚人博士)は外部評価委員会に対して会議開催に先立って次のような任務を与えた：

1. 物構研ミュオン科学研究施設の科学的業績に関する評価：つくば地区における大学共同利用に基づく業績と施設職員による海外ミュオン施設における業績。質と量についての一般的評価。
2. J-PARCの一期が20年度に終了した後、いかにして研究活動が継続されるべきかを勧告。

B) 委員会構成：

秋光 純	青山学院大学
前川禎通	東北大学金属材料研究所
西田信彦	東京工業大学
C. Petitjean	PSI 研究所、スイス
L.I. Ponomarev	Kurchatov 研究所、ロシア
J.-M. Poutissou	TRIUMF 研究所、カナダ（委員長）

C) 会議次第：

高エネ機構ミュオン科学研究施設評価委員会
会議次第

開催日：2008年1月17日（木）

開催場所：KEK 4号館 二階 第一輪講室

1. 評価委員会任務

9:30-9:40

物構研所長 下村 理

2. 口頭発表

高エネ機構ミュオン科学研究施設 概要

9:40-10:20

西山 樟生

最近の特筆すべき研究成果（そのⅠ）

10:20-11:00

門野 良典

最近の特筆すべき研究成果（そのⅡ）

11:00-11:20

西山 樟生

ミューズ建設報告

11:20-11:40

三宅 康博

----- 昼食 -----

3. 非公開審議

13:00-16:40

4. 答申の要約発表

16:40-17:00

J.-M. Poutissou