

**REPORT OF THE EXTERNAL REVIEW ON
MUON SCIENCE LABORATORY**

INSTITUTE OF MATERIALS STRUCTURE SCIENCE
HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION
AND
MUON SECTION, MATERIALS AND LIFE SCIENCE DIVISION
J-PARC CENTER

April 2010

Muon Science Laboratory
IMSS-KEK

Issued in April, 2010

Muon Science Laboratory

Institute of Materials Structure Science

High Energy Accelerator Research Organization

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

Phone: +81-(0)29-864-5602

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

Report of the external review

on

Muon Science Laboratory

Institute of Materials Structure Science

High Energy Accelerator Research Organization

and

Muon Section, Materials and Life Science Division

J-PARC Center

Meeting on March 11th-12th, 2010

KEK Tokai Campus, Japan



Contents

Executive Summary:	1
Overview Session.....	3
R&D for Future Projects	6
1. The Super Omega Project:	6
2. The Superconducting Curved Solenoid for Super Omega:	6
3. U-Line Shield Design and Possible Scenario to Extract μ^+ and μ^- Simultaneously: .	7
Letters of Intent.....	8
1. g-2 Program: muon anomalous g-factor:	8
2. μ N-eN rare process:	9
3. Micro-beam factory:.....	10
Inter-University Research Program using Oversea Muon Facilities	11
Highlights of Scientific Activity.....	11
Highlights of Scientific Activity – R. Kadono:	12
Highlights of Scientific Activity – Y. Miyake:	13
Highlights of Scientific Activity – K. Shimomura:	13
Highlights of Scientific Activity – N. Kawamura:	14
Highlights of Scientific Activity – P. Strasser:	14
Highlights of Scientific Activity – A. Koda:	14
Comments of KEK-MSL research	15
Appendices.....	16
A) Committee membership:	16
B) Agenda:	17

Executive Summary

The meeting of the Muon Science Advisory Committee (MuSAC) was held at J-PARC, Tokai on March 11th and 12th, 2010.

In November 2009, MUSE became the world's most intense pulsed muon beam facility and demonstrated that unprecedented fluxes of 10^7 - 10^8 surface muons per second will be available when the ultimate design value of 1 MW beam power is achieved.

The committee congratulates MSL and all of the people involved at MUSE for their many achievements since the first successful extraction of beam in September 2008.

MuSAC was pleased to hear about the successes of the muon user program, which include the first refereed journal publication from J-PARC (in Physical Review Letters). This demonstrates that even under trying circumstances, the muon facility is already capable of delivering world-class science. At this time the first muon beam line and its spectrometer are currently being optimized in a collaborative effort by JAEA and KEK to service a more versatile and competitive program.

The committee was charged to

1. Review the construction and development works of the J-PARC MUSE Facility made by KEK-MSL in the past year (FY 2009). Evaluate quality and performance in general.
2. Review the scientific outcomes achieved by the Muon Science Laboratory of Institute of Materials Structure Science, KEK (KEK-MSL), based on the activities under Inter-University Research Program utilizing Oversea Muon Facilities (FY 2006~2008) and other scientific research activities (FY 2007-2009). Evaluate quality and productivity in general.
3. Recommend the way how the scientific activities are to be continued after the resumption of the Inter-University Research Program in J-PARC MUSE, and how the construction and development works for the remaining beam lines are to be continued.

The committee reinforces the support of the ultra slow muon beam line for μ SR as a top priority, and acknowledges the progress that has been made thus far in its design. By far the highest priority should be to secure funding for fully developing this beam line, as it promises to be a unique tool for novel experiments in nano-materials

research. The committee is convinced that this beam line has great potential even at reduced power, and that it will attract users from around the globe. It is important to involve the condensed matter physics and materials science communities in this unique opportunity, (e.g. via workshops and in establishing the scientific case. A strong synergy with the R/D program initiated by the $g-2$ collaboration is apparent. KEK and RIKEN are developing a state of the art laser ionization system that will be ideally suited for the J-PARC pulsed muon beam, and is expected to provide a two-order of magnitude enhancement of the ultra-slow muon yield compared to what has been demonstrated at ISIS by the RIKEN-RAL collaboration. The committee recognizes that the $g-2$ experiment will have to build upon the success of the ultra slow muon beam line. The expertise achieved in the development of the muon acceleration section for $g-2$ will in turn be advantageous for realization of next generation muon beam lines, such as the proposed muon micro beam.

In the long term, adding a couple of surface muon experimental stations on the S line would allow the MUSE facility to service a larger user community, both nationally and internationally. The remaining port (H-Line) could be reserved for a specialized, very high acceptance beam line, which could service the $g-2$ experiment, very high luminosity micro beams, negative muon based programs etc. There is an urgency to reaching consensus on the kind of front end that should be installed for this port, as this needs to be done before the activation in the target region makes the task too dose intensive.

The committee was pleased to see the continuous progress made in the development of the D-line, with improved performance provided by the ongoing development of beam line elements (kicker, beam slicer, new separator and quadrupoles), and benefiting from good cooperation between KEK and JAEA. The MUSE team has been extremely successful in this regard. However, maintaining the present infrastructure and completing the other beam lines while running a user program will be a challenge for the personnel. To secure the operation of a strong user program on the existing D1 and D2 legs and to realize the construction of the new ultra slow muon beam line on a short time scale, we recommend strengthening the research and technical staffs of the Muon Science Section of the J-PARC Center.

Overview Session

In the first session, Prof. O. Shimomura and Prof. S. Nagamiya gave overviews of the IMSS and J-PARC activities, and also detailed the charge of the review. Dr. Y. Ikeda then gave a status report on the Material and Life Science experimental Facility, and Prof. Y. Miyake reported on the Muon Science Facility (MUSE).

MuSAC was very interested in hearing about current activities and future plans of the Institute of Material Structure Research from Prof. O. Shimomura. The goal of the institute is to study multi-functional materials and investigate their structures by a synergetic and comprehensive use of muons, neutrons, synchrotron radiation and positrons. Several examples of recent research results in fundamental and applied science were given. As far as the muon facility is concerned, the first priority was specified to be the construction of the ultra slow muon beam line. As already mentioned, this plan is fully endorsed by MuSAC.

The committee was very pleased to hear that the user muon program can now rely on operation with 3 GeV and 120 kW beam power. Even with this preliminary low beam power, MUSE has already succeeded in producing the world's most intense pulsed muon beam line.

The committee expresses its congratulations to the J-PARC and MSL teams for achieving these milestones, and believes that the foundation has now been laid for a bright scientific future. However, the committee has been made aware of relevant budgetary issues, which have adversely affected the ability to purchase some of the necessary muon equipment. At the moment only one muon beam line is operational, and the committee strongly encourages a concerted effort in devising a new strategy for securing the funding needed to complete and operate the other proposed muon beam lines. In discussing the charge of the review, Prof. S. Nagamiya stressed the importance of defining the best possible way to produce excellent scientific results from the J-PARC muon activities. Installation of state-of-the-art instrumentation at the end of existing and future muon beam lines is essential to fully exploit the beam intensity available now and in the future. In this respect we suggest to work out a common strategy with the entire user community to identify external funding sources for providing such instrumentation (spectrometers, sample environment).

Prof. Nagamiya presented a revised time scale for beam power availability in the upcoming years. According to the new plan, the 1 MW level for 3 GeV will be reached by the end of FY 2014.

Dr. Ikeda reviewed the activities at MLF. Several neutron instruments were newly funded in FY 2009, so that now 18 of them are available. Selected examples of scientific results obtained from muon and neutron experiments with 20 kW and 120 kW beam power were given. This early stage operation brought important new lessons and both neutron and muon sources worked very well with 120 kW, and even with 300 kW. Especially important and satisfying is that the temperature rise at the mercury target vessel at 100 and 300 kW is well within the design value. As a consequence of a failure at the accumulator of the low temperature hydrogen circulation loop at the neutron source, about 21 days of user time had to be canceled in FY 2009. However, urgent action has been taken and a recovery plan has been worked out to restart user operation at the beginning of May 2010 and to compensate the losses in user time.

Prof. Miyake presented detailed status and plans of J-PARC MUSE, along with the construction history of the M2 proton tunnel, muon target and secondary muon beam line. The completion of phase 1 of J-PARC MUSE represented the culmination of an enormous amount of work by the small muon group in MLF. The achievements are particularly remarkable in view of the fact that user runs have taken place in 2009 and at the beginning of 2010. The committee wants to congratulate all the people involved for this outstanding performance.

Over the past year a mock-up test exchange of the radioactive muon target was successfully performed, a 30-year old superconducting solenoid from KEK was installed in the decay section of the muon D-line, and repairs to the solenoid's cryogenic system were made. A rotating target system that will be necessary when the power is increased to 1 MW is currently under development. In addition, the committee was informed about two key upgrades of the secondary D-line that have resulted in a world-class muon beam line for μ SR applications. The old 100 mm-gap DC separator brought in from KEK was replaced with a new 200 mm-gap DC separator to allow more muons to pass through. The wider gap has greatly increased the muon intensity, and in 2009 the world's most intense muon beam was achieved. Further increases in intensity are anticipated in 2010, with the installation of a new power supply for

the separator and large aperture quadrupoles. The committee also learned that a fast beam slicer was developed by Dr. W. Higemoto as a JAEA-ASRC funded project and installed on the D1-leg. A narrow 37 ns muon pulse has been produced by the slicer, resulting in a major improvement in the timing resolution and hence utility of the D1 beamline. Here the committee would like to point out the benefit of a shorter pulse width for the 3 GeV proton beam, which would make beam slicing more effective.

The committee was also told about the development of a kicker device that will enable the simultaneous operation of the D1 and D2 legs of the D-line. At present only the D1 leg is equipped with a spectrometer and instrumentation for μ SR experiments. Under the current plan the kicker device will be installed early in 2011. To realize the full scientific potential of the D-line, it is essential that this happen on time. The development of the D-line, whose operational D1 leg has already produced the first scientific results published by J-PARC, has been very impressive. It is commendable that the construction of the D-line has been achieved by reusing elements from the old KEK muon beam lines, and under very tight budgetary constraints. The Committee considers this a tribute to the hard work and dedication of the muon personnel.

R&D for Future Projects

1. The Super Omega Project:

MuSAC was extremely interested to hear of the developments associated with the Super Omega Project by Dr. K. Shimomura (KEK-MSL). Conceptually the Super Omega Beam line can potentially offer the most intense pulsed surface μ^+ beam in the world ($4 \times 10^8/s$), whilst also having the option of delivering intense beams of cloud μ^- muons ($1 \times 10^7/s$). Even more significantly, when coupled with efficient muon ionization technology, it will enable J-PARC develop a uniquely powerful pulsed ultra slow muon facility with muon energies in the range 0.05-30 keV, pulse widths of the order of 8 ns and rates of 10^4 - $10^6/s$. Such a facility will undoubtedly lead to major breakthroughs in the exploration and understanding of key surface phenomena in solid state physics, chemistry and materials science.

In order to achieve the highest ultra slow muon intensities, the development and installation of the beam line must be accompanied by the development of laser facilities with the appropriate characteristics. Particular challenges include generation of pulsed high intensity laser beams with optimized bandwidths and reduced jitter relative to the external timing triggers. Such laser beam developments are of significance to other muon beam projects at J-PARC and should therefore be addressed.

MuSAC learned that the Super Omega Beam line will consist of three sections; a normal conducting capture solenoid (which is already installed), a superconducting transport solenoid (which is now reaching the final design stage) and an axial focusing magnet (which is still under design). The beam line is therefore extremely complex and represents a major undertaking in both design and construction. MuSAC therefore acknowledges the significant progress that has been achieved over the past financial year, and warmly encourages continuation and completion of the Super Omega project at the very highest priority.

2. The Superconducting Curved Solenoid for Super Omega:

In the presentation of Dr. K. Makida MuSAC was given a more detailed overview of the superconducting curved solenoidal component of Super Omega. The solenoid

consists of a 6m long straight section, bounded at each end by sections set at 45° to the straight section. The field within the solenoid will be of the order of 1.2 T, enabling the economical use of Nb-Ti filamentary wire (providing a maximum field of 3 T). The field profile along the solenoid must be within a 5% tolerance of the calculated value in order to achieve a transport efficiency of greater than 80%. Selection of the muon beam polarity will be facilitated by meter long dipoles providing a vertical magnetic field of 0.1 T just after the first 45° bend, and just before the second bend.

It was noted that the first section of the solenoid and the first meter of the straight section will be subject to high radiation fields. Consequently research is underway to establish whether the resin used in the coil windings can adequately sustain these radiation levels.

The construction of the Super Omega Solenoid is currently out to tender, with a view to placing the contract by May 2010, and taking delivery and installing on the beam line in the summer of 2011.

3. U-Line Shield Design and Possible Scenario to Extract μ^+ and μ^- Simultaneously:

An overview of the experimental muon beam area associated with the (existing) D and (planned) U beam lines was presented Dr. P. Strasser. MuSAC noted that with both the D and U lines in operation (the latter housing the super omega facility) space will be at a premium in the experimental area. The simultaneous delivery and utilization of μ^+ and μ^- beams will therefore be extremely challenging.

Nevertheless, MuSAC was shown how this challenge could be met through an extension to the Super Omega beam line, consisting of two large quadrupole triplets followed by a bending magnet delivering beam into two legs each consisting of further quadrupole triplets. One leg would deliver μ^+ and the other μ^- .

This assembly would take the U beam line beyond the D1 area, and would provide two separate experimental ports for (a) the Ultra Slow Muon Facility and (b) the μ^- muonic atom facility.

MuSAC welcomed the design study, whilst also recognizing that there is still much work to be done. Nevertheless, the time scale for delivery and commissioning of Super Omega should allow this design study to be brought to completion.

Letters of Intent

1. $g-2$ Program: muon anomalous g -factor:

The goal of this new proposal to J-PARC is to determine the anomalous magnetic moment of the muon to a precision level of 10^{-9} . This is sufficient to establish with confidence whether or not there is a discrepancy with the Standard model prediction, as hinted by the recent measurement of E821 at BNL (where a 3.7 sigma difference was reported). If proven to be true, this would be a benchmark constraint on possible extensions of the Standard model of particle physics, of which there are many. However, this by itself will not identify which model is most promising.

The J-PARC experiment will be based upon an entirely new method, which will use low energy muons (300 MeV), as compared to 3 GeV muons for the BNL experiment. This will have the advantage of avoiding some of the most challenging corrections and the dominant systematic errors associated with them. However, the requirements for the muon beam emittance are pushing what is currently achievable, making the proposal somewhat risky. Nevertheless, no absolute show stoppers have been identified yet.

The proposal is original, and will produce a result with entirely different systematic uncertainties than those of the BNL experiment, while its successor at Fermilab will reuse the BNL technique with an improved 3 GeV beam intensity.

There are four areas of R/D that need to be pursued actively:

- Laser ionization development
- Cold muonium source
- Accelerator
- Storage magnet and detector systems

The ultra slow muon source is based upon development of muonium laser ionization over the past ten years at the RIKEN-RAL facility in collaboration with KEK-MSL, which has resulted in the production of 20 ultra cold muons per sec at ISIS. The expertise of the RIKEN laboratory in the use of powerful pulsed UV lasers is critical here, and a solid collaboration with the expert group of Dr. Wada has been established. A factor of 100 improvement in ionization efficiency is required. If achieved, this can

be tested and implemented at the RIKEN-RAL facility and would already provide a very interesting pulsed ultra slow muon beam for condensed matter physics studies that will be competitive and complementary to the PSI DC low-energy muon source.

The other requirement of low transverse and longitudinal emittance can be realized if sufficient muonium can be produced from a cold surface (rather than the hot foil used at RIKEN-RAL). This development is the responsibility of Dr. Iwasaki's group, who again are making use of the group's expertise in muon beams, nano-material technologies available at RIKEN, and in several other Japanese materials science groups. The responsibilities of the group are well matched to their abilities and they have engaged in multi-institutional collaborations to foster the development. The group is well organized and has refocused several of their other programs to support the demanding R/D effort. The leadership of Dr. Iwasaki in pushing the $g-2$ experiment is well recognized in the international collaboration, which is growing around the $g-2$ program at J-PARC. These muon source developments are of great interest to the materials science community using μ SR techniques. The committee recognizes that the $g-2$ experiment will have to build upon the success of the ultra slow muon beam line. The expertise achieved in the development of the muon acceleration section for $g-2$ will in turn be advantageous for the realization of next generation muon beam lines, such as the proposed muon micro beam.

2. μ N-eN rare process:

The committee heard a presentation by Prof. Aoki on a letter of intent to use a novel method to identify the flavor violating process: μ^- to electron conversion. The idea is to use negative muons decaying in the surface layer of the production target itself and to identify delay 105 MeV electrons by a beam line and an electron detector. The concept is novel and some preliminary tests have confirmed that delayed electrons can be identified with reasonable background levels. The concept may work but it is difficult to assess the sensitivity of the proposed detection scheme. Further simulations and validation of the background levels are necessary here. For example, the acceptance of the system is not very well understood. The level of sensitivity discussed in the letter is an order of magnitude improvement over the PSI measurement, but this is based

on a back-of-the-envelope calculation with very large uncertainties. It is not yet clear whether sufficient gain can be achieved to make the proposal viable. Interference with COMET must also be taken into account, as the same people will be involved in both projects. COMET is a much more mature proposal that would suffer delays if the proposed method is chosen to do an intermediate sensitivity test.

3. Micro-beam factory:

Prof. Nagamine presented a letter of intent about a pulsed muon beam in the 10-100 MeV energy range. The idea is to accelerate a degraded muon beam (positive or negative charge) to 10 MeV by RFQ and a Linac. Since the normalized emittance is conserved in the acceleration, a beam spot size at the sample position of $< 1 \text{ mm}^2$ may be obtained. Subsequent acceleration to higher energies is possible and the range of applications is broad. For instance, in condensed matter physics such a beam may be used to perform high pressure experiments well in excess of the present limit of 1-2 GPa. Muon spin imaging and radiography in life and applied industrial sciences, and muon catalyzed fusion studies would also profit from the availability of this beam. The time scale for developing this next generation beam is not yet defined, and a detailed simulation would be very useful at this point to define all of the relevant parameters of the beam and fully assess its potential. Even so, the committee finds the idea intriguing, and sees synergies with the muon accelerator scheme proposed by the g-2 project that should be exploited.

Inter-University Research Program using Oversea Muon Facilities

Highlights of Scientific Activity

Prof. Kadono gave an overview of the Inter-University Research program using Oversea Muon Facilities (IURP-OMF) and an activity report of the Muon Science Laboratory for FY 2007-2009.

IURP-OMF ran from 2006-2008 with the goal to preserve the activities of the Muon Science Laboratory at KEK during the construction phase of J-PARC MUSE. The number of approved proposals within this program was about 30 per year, a number just slightly below the level reached at the previous BOOM facility in Tsukuba. This shows that one of the main purposes of the program, namely to maintain a vigorous scientific activity during a transition phase, was well fulfilled. The researchers made a balanced use of overseas facilities such as TRIUMF, PSI and RIKEN-RAL. Also the fields of research and the distribution of research participants demonstrate the broad use throughout the Japanese research institutions of this program.

The committee was shown examples of results obtained in various fields. μ SR is a unique probe to study magnetic and superconducting materials and more than 70% of the activities were concerned with these two fields. In the field of high- T_c superconductors the Tohoku, Riken groups studied how magnetic (Ni) or non-magnetic impurities (Zn) affect the Cu spin correlations in the 214 cuprate compound. The results indicate that the magnetic moment of Ni is not relevant in the suppression of high- T_c superconductivity in the CuO planes.

Muon spin rotation is very sensitive to local and disordered magnetic order. This feature has been used by the Toyota Motor company group to clarify the absence of magnetic order on the CoO_2 triangular lattice of Li_xCoO_2 . The results, which have been published in Physical Review Letters, indicate paramagnetism and metallic behavior for all the samples with x below 1/3 in spite of theoretical predictions of a Mott insulating ground state. These materials are very interesting candidates for rechargeable batteries and the research establishes new and useful links between applied and fundamental physical studies.

The detection of a spontaneous peculiar muon spin precession in the PrPb_3 system, which has a non magnetic ground state, lead to the discovery of the formation of a

three spin system involving the muon and the two Pr ions with a dipolar coupling between the muon spin and the hyperfine enhanced Pr nuclear magnetic moment. Also this work led to several publications, including in Physical Review Letters. These and the many other results presented show that the IURP-OMF program was completed with significant scientific outcome and has fulfilled the task of maintaining a vigorous Muon Science program during J-PARC construction. This is demonstrated by the number of publications (23 journal papers and 31 proceeding papers) and the number of Ph.D. theses (4) and M.Sc. theses (4) awarded during FY 2007-2009.

Highlights of Scientific Activity – R. Kadono:

In the second part of his talk Prof. Kadono specifically presented highlights of research involving the MSL group. The group engaged in a variety of muon-based projects in the 2007-2009 period that included studies of multi-gap superconductivity (e.g. in the sesquicarbides compounds La_2C_3 and Y_2C_3 , which have relatively high critical temperatures), the new iron-based high-temperature superconductors, and the role of hydrogen-bonding in the kinetics of a potential hydrogen-storage material.

This work resulted in a significant number of peer-reviewed publications (32 in total), including 3 in Physical Review Letters, which traditionally has been the top pure physics journal. One of these papers is a μSR study of a recently discovered Co-doped iron pnictide compound that establishes macroscopic phase separation between superconducting and magnetic phases. CaFeAsF is magnetic at low temperatures but becomes superconducting when about 10% of the iron is substituted with cobalt. Substitution in CaFeAsF superconductors leads to insular superconductivity around the Co atoms (an effect opposite to Zn and Ni substitution in cuprates), which leads to the formation of superconducting regions in the magnetic sea.

This is very timely work on a family of iron-based superconductors that has sparked a flurry of worldwide activity. The paper on this work was highlighted by Nature Asia Materials, and is apparently the first in a refereed journal that includes measurements performed at J-PARC. In general, the research carried out by this group over the past 3 years has focused on topics of great current interest to the condensed matter physics and other scientific communities. Furthermore, the level of scientific output over this time period is comparable to that of the top μSR researchers in the world.

Highlights of Scientific Activity – Y. Miyake:

Prof. Miyake reviewed the ultra-slow-muon beam project in progress at Port 3 of the RIKEN-RAL muon facility in ISIS, including the first experimental results using this beam line on the perovskite-type manganite $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ thin film. The KEK-MSL group in collaboration with RIKEN members, has already succeeded in generating ultra slow muon beams by using their original technique of laser resonant ionization. The advantages of this method are a high temporal resolution, a small beam size and a variable-energy implantation of muons. They have achieved a FWHM pulse width of ~ 9 ns, a beam size of $\sim 3.3 \times 4.1$ mm² at the sample position (for 9.0 keV beam energy), and an implantation energy range of 1-18 keV with 10 nm depth resolution. In addition, the S/N ratio has now been improved by a factor of ~ 250 . Using this experimental setup they studied the successive phase transitions of a $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ thin film having a thickness of 80 nm. They have found that the μSR spectra obtained at three different temperatures corresponding to the paramagnetic insulating, ferromagnetic metallic and charge-ordered insulating phases show significant changes in the initial asymmetry. This exploratory experiment is quite successful despite the present limited beam intensity of ~ 20 muons/s, and demonstrates the applicability of a pulsed ultra-low energy muon beam in various fields if this system is installed at J-PARC with the expected intensity of $\sim 10^5$ muons/s.

Highlights of Scientific Activity – K. Shimomura:

Dr. Shimomura and his group have been making interesting contributions to semiconductor research by means of the μSR techniques. Information on the role of hydrogen impurities is very important in semiconductor technology, and only μSR provides such information. The measurements have revealed shallow donor states of Mu in TiO_2 in addition to ZnO and GaN, and have confirmed the importance of hydrogen impurities. The negative muon spin rotation ($\mu^- \text{SR}$) technique was also applied to understand microscopically the role of nitrogen impurities as acceptor centers in semiconductors. The use of muonic atoms (such as muonic oxygen) in these studies provides fruitful and important information on impurities in semiconductors. The use of laser techniques developed by the group are also opening up new research avenues, such as the observation of a Mu spin dependent interaction with polarized electrons in GaAs.

Highlights of Scientific Activity – N. Kawamura:

Dr. Kawamura presented the case for a slow negative muon beam. At J-PARC energies, the cross section for π^- production (and therefore for μ^-) is larger than at existing facilities. For the production of very low energy muon beams, schemes which are applicable to the positive charge (cryogenic moderator method, laser ionization of muonium) are not working. A possibility is to slow down negative muons in a cyclotron trap (as has been demonstrated at PSI), and then extract and further cool the negative muon beam by use of frictional cooling. At this moment the slow negative muon beam project at J-PARC is in its infancy. Monte Carlo simulations for design of the beam line are currently under way, and some preliminary test experiments making use of a gas electron multiplier chamber (GEM) to determine the phase space of the incoming beam have been performed. The tests have shown that GEM can provide the required space resolution. Dr. Kawamura stressed the importance of collaborating with the electronics group at KEK for further development of this device.

Highlights of Scientific Activity – P. Strasser:

Dr. Strasser reported about muon transfer studies in solid deuterium with implanted rare-earth and alkaline-earth ions. The final goal of this project is to form muonic radioactive atoms. This would allow for instance to measure nuclear charge distributions and deformation properties of unstable nuclei. Tests using stable ions were performed at the RIKEN-RAL facility where muonic strontium transfer X-rays were clearly observed with trace isotopes. The first experiments with radioactive ions may be realized at RIKEN-RAL. The committee was interested in these results and thinks that an application of the technique at J-PARC will depend on the outcome of the RIKEN-RAL experiments.

Highlights of Scientific Activity – A. Koda:

MuSAC was presented with an overview of the design and implementation of the data acquisition system for J-PARC first operational μ SR spectrometer (which is located on the D1 beam line), and of the performance of this system under operation at a proton beam power of 300 kW. A report was also given on the deployment of inexpensive, high gain and field insensitive multipixel photon counters (MPPC).

MuSAC found the technical developments to be both innovative and successful.

The remaining part of the presentation focused upon μ SR studies of spin dynamics in the technologically important, and scientifically interesting class of materials known as multiferroics, in which the magneto-electric effects require symmetry breaking of both time-reversal and inversion symmetries. The particular multiferroic under investigation was TbMnO_3 , a material which undergoes a sequence of magnetic and electronic transitions on cooling between 42 K, 27 K and 7 K.

Longitudinal field μ SR experiments were carried out at TRIUMF during 2009, and despite the clear transitions identified by other studies, spin dynamics were observed over the entire temperature range; evolving essentially continuously through the reported transitions and into the multiferroic phases. The spin fluctuation rate, which has been followed over 3 orders of magnitude in frequency, exhibits an Arrhenius behavior over most of the temperature range.

Although it remains to be seen how the observed dynamics can be reconciled with the evolution of magneto-electric phases observed in bulk measurements, MuSAC considered the experiments to be extremely interesting and believes that they could provide new insight into the extremely topical subject of multiferroic behavior.

Comments of KEK-MSL research

The level of scientific output from the KEK-MSL, as measured by peer-reviewed publications, appears to have been maintained during the construction of J-PARC MUSE. The committee was particularly impressed with the diversity of research carried out by a relatively small group, and the commitment to experiments on materials with potential in future technological applications. Some of the group's research projects require the high-timing resolution of a DC muon source, and some continued utilization of overseas facilities will be required to maintain these activities. However, the preservation of research activity during the construction of J-PARC MUSE should allow for seamless integration of much of the current research activity into the new facility. We are confident that a large part of the scientific activities of the groups involved in this program will profit from the increasing availability of muons facilities at MUSE.

Overall the committee is impressed by the high quality and wide spectrum of the scientific output, especially considering that some of the groups were simultaneously involved in the construction of the MUSE facility.

Appendices

A) Committee membership:

J. Akimitsu Aoyama-Gakuin University

H. Amitsuka Hokkaido University

R. Cywinski University of Huddersfield

E. Morenzoni PSI (Chair)

J.-M. Poutissou TRIUMF

A. Shinohara Osaka University

J. E. Sonier Simon Fraser University

E. Torikai Yamanashi University

B) Agenda:

MuSAC-2009 Agenda

Date & Time Mar. 11 (Thurs.) - 12 (Fri.)

Place KEK Tokai Campus

Ibaraki Quantum Beam Research Center Bldng. 2F Main Hall

March 11 (Thu.), 2010

9:00 -9:10 Greeting/Charge of Review O. Shimomura (IMSS)

9:15 -9:40 Closed Session

[J-PARC MUSE Activity]

I. Overview Session

9:40 - 9:55 MLF Overview Y. Ikeda

10:00 -10:25 MUSE Overview Y. Miyake

10:30 -10:50 J-PARC Overview/Charge of Review S. Nagamiya

10:55 -11:10 *Coffee Break*

II. MUSE Facility

11:10 -11:25 Status of MUSE (M2 line &D-Line) N. Kawamura

11:30 -11:45 Muon Beam Slicer W. Higemoto

11:50 -12:10 Kicker System K. Koseki

12:15 -13:30 *Lunch*

III. R&D for Future Project

13:30 -13:50 SuperOmega Project and Concept of Radiation
K. Shimomura

13:55 -14:15 Superconducting Curved Solenoid Y. Makida

14:20 -14:40 Shield design and possible scenario to extract μ^+ and μ^- at the same time
P. Strasser

14:45 -15:00 *Coffee Break*

IV. Letters of Intent

15:00 -15:25	Muon anomalous g-factor	N. Saito*
15:30 -15:55	μ N-eN rare process	M. Aoki
16:00 -16:20	Micro-beam Factory	K. Nagamine
16:25 -16:40	Updated “Roadmap” for MUSE	R. Kadono
		(*via video)
16:45 -17:50		Closed Session
18:00-		Welcome Party

March 12 (Fri.), 2010

[Inter-University Research Program using Oversea Muon Facilities (IURP-OMF) and other activities]

V. KEK-MSL Review (2006-2009)

9:00 - 9:15	Overview of IMSS	O. Shimomura
9:20 - 9:45	Review of IURP-OMF Program	R. Kadono
9:50 -10:05	Highlights of Scientific Activity	R. Kadono
10:10 -10:25	Highlights of Scientific Activity	Y. Miyake
10:30 -10:45	Highlights of Scientific Activity	K. Shimomura
10:50 -11:05	Highlights of Scientific Activity	N. Kawamura
11:10 -11:25	Highlights of Scientific Activity	P. Strasser
11:30 -11:45	Highlights of Scientific Activity	A. Koda

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

13:00 -14:40	Closed Session	
14:40 -15:00	Summary Talk	(Chairman)
15:00 -17:00	J-PARC Tour	

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

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン ミュオンセクション

2010年3月11～12日開催

於 高エネルギー加速器研究機構 東海キャンパス

目次

要旨	1
概要説明のセッション.....	3
将来計画のための R&D	5
1. スーパーオメガプロジェクト	5
2. スーパーオメガ用超伝導湾曲ソレノイド	6
3. U-ラインの遮蔽体設計と μ^+ 、 μ^- 同時取り出しの可能性	6
実験趣意書 (Letter of Intent)	7
1. g-2 計画：ミュオン異常磁気能率	7
2. μ N-eN 希少過程	8
3. マイクロビーム工場	9
海外ミュオン施設利用大学共同利用実験.....	10
研究活動のハイライト	10
研究活動のハイライト—門野良典.....	11
研究活動のハイライト—三宅康博.....	11
研究活動のハイライト—下村浩一郎.....	12
研究活動のハイライト—河村成肇.....	12
研究活動のハイライト—ストラッサー・パトリック.....	13
研究活動のハイライト—幸田章宏.....	13
ミュオン科学研究系の研究活動に対するコメント	14
委員会構成.....	15

要旨

ミュオン科学諮問委員会 (MuSAC) 会議は、2010年3月11日~12日にかけて東海の地 J-PARC にて開催された。

2009年11月、ミュオン科学実験施設 (MUSE) は世界最高強度のパルス状ミュオンビーム施設となり、加速器が設計値である 1 MW を達成する暁には毎秒 10^7 - 10^8 個という前例のない強度の表面ミュオンが利用可能になるであろうことを示した。

本委員会は、2008年9月の最初のビーム取り出し成功以降にもたらされた数多くの成果に鑑み、ミュオン科学研究系 (MSL) および MUSE に関わった全ての人々に対して祝意を表すものである。

本委員会はまた、査読付き論文誌 (フィジカル・レビュー・レターズ) に掲載された J-PARC からの最初の成果が同施設で得られるなど、ミュオン共同利用実験が成功裏に進行していることを慶賀するものである。これは、ミュオン施設が試験的な運転状況にあってさえ既に世界的な成果を挙げ得ることを実証している。現在、最初に整備されたビームラインと付随する分光器は、原研機構と KEK との協力の下、より汎用で強力な共同利用研究に適したものになるよう調整が進められている。

本委員会は以下の諸点について諮問を受けた。即ち、

1. 2009年度に物質構造科学研究所ミュオン科学研究系 (KEK-MSL) によって行なわれた J-PARC MUSE 施設の建設および研究開発について、その質と実績を全般的に評価すること。
2. 海外ミュオン施設を用いた大学共同利用実験プログラム (2006年度~2008年度) に基づいて KEK-MSL によってなされた研究成果、および KEK-MSL によるその他の研究成果 (2007年度~2009年度) について、その質と実績を全般的に評価すること。
3. J-PARC MUSE での大学共同利用実験プログラムが再開されたことを承けて、今後研究活動がどのように進められるべきか、また残るビームラインの建設・開発の仕事がどのように進められるべきかについて答申を行なうこと。

本委員会は、ミュオンスピン回転 (μ SR) 実験のための超低速ミュオンビームラインに最高の優先度を与えることを支持するものであり、その設計についてこれまでに成された進展を確認した。何にも増して優先されるべき点は、本ビームラインを完全に展開するための予算が確保されることであり、それによりナノ材料研究での新しい実験のための唯一無二の手法が約束されることになる。本委員会は、限られたビーム出力においても超低速ミュオンビームの潜在的な威力、またそれが全世界の利用者を惹き付けるであろうことについて確信を持つに至った。この機会に凝集系物理学や材料科学のコミュニティに参加を促すこと (例えばワークショップや科学的有効性の検

証などで)が重要である。g-2 グループによる研究開発プログラムとの強力な相乗効果が期待できることは明らかである。KEK と理研は J-PARC のパルスビームにとって理想的な最先端のレーザーイオン化システムを開発中であり、これによって、理研 RAL の共同研究チームが ISIS において実証した値より二桁増の超低速ミュオンビーム強度がもたらされると期待される。本委員会は、g-2 実験がこの超低速ミュオンビームラインの成功に基づいて進められるべきものであることを認める。翻って、g-2 実験のミュオン後段加速で得られる経験は、マイクロミュオンビームなど次世代のミュオンビームの実現にも有効であろう。

長期的に見ると、S ラインに 1 対の表面ミュオンビーム実験ステーションを整備することで、ミュオン科学施設はより大きなコミュニティの利用に供することが出来る。残りの取出し口 (H ライン) は特殊な大立体角ビームライン用として確保され、g-2 実験、高輝度マイクロビーム、負ミュオンによる研究等に供され得るであろう。この取出し口については、ミュオン生成標的の放射化に伴い作業がより困難になる前に機器の設置がなされる必要があり、どのような先頭部機器を整備するかについて速やかに合意を形成する必要がある。

本委員会は、D ラインについての研究開発 (キッカー、ビームスライサー、および四重極磁石) により性能の向上がもたらされ、KEK と原研機構の間の協力による恩恵も受けて引き続き進歩していることについて好感を持って拝聴した。ミュオンチームはこの点に関してきわめて成功しているといえる。しかしながら、共同利用実験を行いながら、現有の施設を維持しつつ他のビームラインを完成させることは挑戦的な課題となるであろう。D1 および D2 ラインで共同利用実験を強力に押し進めつつ、短期間に超低速ミュオンビームラインを新たに建設するために、我々は J-PARC センターのミュオンセクション所属の研究および技術職員を強化することを勧告するものである。

概要説明のセッション

最初のセッションにおいて、下村物構研所長、および永宮 J-PARC センター長より物構研、および J-PARC センターの活動について概要説明が行なわれた。引き続き池田物質生命科学ディビジョン長、および三宅ミュオンセクションリーダーから同ディビジョン、およびミュオン科学研究施設 (MUSE) の現状報告が行なわれた。

MuSAC (以下本委員会) は、物構研の現在の活動状況および将来計画についての下村教授による説明を大変興味深く拝聴した。研究所の目的は機能性材料の研究、およびそれらの構造を調べるに際しミュオン、中性子、放射光、および陽電子を相乗的かつ効果的に用いることである。いくつかの基礎および応用科学上の研究例が紹介された。ミュオンについては、超低速ミュオンビームライン建設が第一に優先されるべきことが明確にされた。すでに触れたように、本委員会はこの方針を全面的に支持するものである。

本委員会は、大学共同利用実験プログラムが今や 3 GeV-120 kW のビーム出力によって行なわれていることを大いに喜ぶものである。このような予備的な低出力においても、MUSE は既に世界最高強度のパルス状ミュオンビームラインを創り出すことに成功している。

本委員会としては、このような里程碑に到達したことに対し J-PARC および MUSE の建設チームに祝意を表し、輝かしい科学的展望への基礎が築かれたものと信じるものである。しかしながら、関連する予算の問題のために、必要なミュオン実験装置を購入できない状況にあることも本委員会は気づかされることになった。現時点では一本のミュオンビームラインのみが利用可能であり、本委員会としては、提案されている他のビームライン建設・運用を確実にするために、必要な予算獲得のための新たな戦略の立案に向けて関係者が組織的な努力を行なうことを強く奨励したい。本委員会の任務を議論するに際し、永宮センター長は、J-PARC ミュオンの活動がすばらしい科学的成果をもたらすような最適の方法を見いだすことの重要性を強調した。現在あるビームライン、および将来整備されるビームラインの終端に最先端の実験装置を導入することは、現状および将来利用可能なビーム強度を最大限に活用する上で必須である。この点について我々は、そのような装置 (分光器、試料環境) を手当する外部資金を探すための共通戦略を、コミュニティ全体と相談の上策定するよう提案する。

永宮センター長からは、将来利用可能となるビーム出力について改訂された予定表が提示された。新しい計画によれば、2014 年度までに 3 GeV で 1 MW を達成できるとされている。

池田 (裕) MLF ディビジョン長は MLF の活動について概説した。2009 年度にはいくつかの中性子実験装置について新たに予算措置が講じられ、現在 18 台の装置が

利用可能になっている。ミュオンおよび中性子実験の中から、20 kW および 120 kW 運転時に得られたいくつかの代表的な成果について報告がなされた。この初期運転から新たに重要な経験が得られるとともに、120 kW 時においても中性子源、ミュオン源いずれも極めて順調に稼働し、300 kW の試験運転においても同様であった。最も重要かつ満足すべき点は、100 kW 及び 300 kW の運転時にも水銀標的容器の温度上昇が余裕を持って設計値の範囲内に収まっていることである。中性子源の液体水素循環系におけるアキュムレータ部の不調により、2009 年度に予定されていた共同利用のうち約 21 日分がやむを得ずキャンセルされた。しかしながら、迅速な対応が取られるとともに、2010 年 5 月初頭に共同利用を再開すべく復旧計画が立てられ、共同利用時間の損失を補償する措置が講じられている。

三宅セクションリーダーは J-PARC MUSE の M2 陽子ビームトンネル、ミュオン生成標的および二次ミュオンビームラインの建設経過、およびその現状と将来計画について詳細な報告を行なった。J-PARC MUSE の第一期が完成したことは、MLF の中でも小さなミュオングループが背負った恐るべき量の仕事がここに結実したことを意味するものである。既に共同利用実験が 2009 年および 2010 年に行なわれたという点で、その業績は特筆に値する。本委員会はこの並外れた偉業に関わった全ての人々に対して祝意を表したい。

この一年間の進展として、放射化したミュオン生成標的の交換についての模擬試験が成功裏に行なわれ、製造から 30 年という超伝導ソレノイドが KEK (つくば) からミュオン D ラインの崩壊セクションに導入されるとともに、ソレノイドの冷凍機システムの改修も行なわれた。1 MW 運転時に必要となる回転標的システムの開発も進行している。さらに本委員会は、二次 D ラインが μ SR への応用上で世界レベルのミュオンビームラインとなる上で鍵となった二つの高度化についての報告を受けた。その一つは、つくばより持ち込んだ電極間隔 100 mm の古い静電分離器を同 200 mm の新しい装置に置き換えて、より多くのミュオンが通過できるようにしたことである。電極間隔が大きくなったことで、ミュオン強度は飛躍的に上昇し、2009 年には世界最高強度のパルス状ミュオンビームを達成した。静電分離器用の新たな電源、およびより口径の大きな四重極電磁石の投入により、2010 年にはさらなるビーム強度の増大が期待される。本委員会はまた、JAEA-ASRC の予算措置によるプロジェクトとしてビーム・スライサーが髭本氏により開発され、D1 実験エリアに導入された旨の報告を受けた。ここで本委員会は、3 GeV 陽子ビームのパルス幅がより短くなることで、ビームの切り出しがより効果的になる、というメリットを指摘しておきたい。

D ライン上の D1 および D2 エリアでの同時実験を可能にするビーム・キッカー装置の開発についても本委員会は報告を受けた。現時点では D1 エリアのみに μ SR のための分光器及び実験装置が備えられている。現状の計画では 2011 年の早い時期にキ

ッカー装置を導入することになっている。Dラインの潜在的な能力を全面的に引き出す上で、これを計画通りに実現させることは不可欠である。既に稼働しているD1エリアでJ-PARCに関して出版された最初の学術的成果が得られるなど、Dラインの発展は目覚ましいものがあった。予算的な制約の下、Dラインがつくばの古いビームラインで使用されていた機器の再利用により整備されたということは賞賛に値する。本委員会は、これをミュオン関係者の労苦と献身の証と考えるものである。

将来計画のための R & D

1. スーパーオメガプロジェクト

本委員会は、スーパーオメガプロジェクトに関連する下村（浩）氏の研究開発について大変興味深く拝聴した。理論的には、スーパーオメガビームラインは世界最高強度 ($4 \times 10^8/s$) のパルス状表面 μ^+ をもたらす可能性があり、一方でまた大強度 ($1 \times 10^7/s$) のクラウド μ^- をもたらすという選択肢も持つ。さらに重要なことに、前者と効率的なミュオンイオン化手法との組み合わせにより、エネルギーレンジが 0.05 ~ 30 keV で、パルス幅 8 ns 中に $10^4 \sim 10^6/s$ という極めてユニークで強力なパルス状超低速ミュオンビームを J-PARC で開発することが可能になる。そのような施設が実現すれば、固体物理、化学および材料科学に関わる重要な表面現象の探索と解明において画期的な突破口を開くであろうことに疑問の余地はない。

最高強度の超低速ミュオンビームを実現するために、ビームラインの開発・導入と同時に適切な性能を持つレーザー系の開発も不可欠である。最適なバンド幅を持ち、外部トリガ信号に対する揺らぎを押さえた高強度パルスレーザーを開発することは特に困難な課題の一つであろう。そのようなレーザーの開発は J-PARC における他のミュオンビームプロジェクトにとっても重要であり、取り組むべき課題として数えられるべきである。

本委員会が学んだことには、スーパーオメガビームラインは三つの部分からなる。即ち、ミュオン捕獲用常伝導ソレノイド（既設）、ビーム輸送用超伝導ソレノイド（現在設計の最終段階にある）、および軸収束磁石（まだ設計中）である。従ってビームラインは極めて複雑であり、設計製作いずれにおいても大事業であることを意味している。それ故本委員会は、この一年に重要な進展がなされたことを認めるとともに、スーパーオメガプロジェクトが最高の優先順位で継続され、完成するよう心から応援するものである。

2. スーパーオメガ用超伝導湾曲ソレノイド

槇田氏の講演において、本委員会はスーパーオメガビームラインの中の超伝導湾曲ソレノイド部分についてより詳細な説明を受けた。ソレノイドは6 mの直線部、およびその両側と直線部に対して45度でつながる湾曲部からなる。ソレノイド内部の磁場はおよそ1.2テスラであり、経済的なNb-Tiフィラメントの超伝導線材(3テスラの磁場を生成可能)を使うことが出来る。80%のビーム輸送効率を達成するために、ソレノイドに沿った磁場の大きさは計算値から5%以内のずれに収まる必要がある。最初の45度湾曲部直後、および二番目の湾曲部の直前に一メートル程度の長さの双極磁石を置き、0.1テスラの垂直方向磁場を印加することにより、ミュオンの極性を選ぶことが可能になる。

ソレノイドの先頭部分、および直線部の最初の一メートル程度が高い放射線場に晒されることが明らかにされた。これを受けて、コイルの巻き線時に用いられるレジン絶縁体がそのような放射線場に耐えられるかどうかの研究が進行中である。

現在、スーパーオメガソレノイド部は入札にかけられており、2010年5月には落札業者との契約、2011年夏のビームラインへの導入設置が見込まれている。

3. U-ラインの遮蔽体設計と μ^+ 、 μ^- 同時取り出しの可能性

P. ストラッサー氏により、既設のDラインおよび計画中のUラインに付随する実験エリアの設計についての概略説明が行なわれた。本委員会は、DラインおよびUライン(後者はスーパーオメガライン設備を含む)のいずれもが稼働した場合、空間的な問題が大きいことを認識するに至った。従って、 μ^+ および μ^- の同時利用は極めて困難なものになるであろう。

しかしながら本委員会は、二つの大きな四重極磁石でスーパーオメガラインを延長し、さらに偏極磁石とそれに続く二組の三連の四重極磁石で分岐して一方に μ^+ もう一方に μ^- を輸送することで、この困難を回避できる可能性を提示された。

この構成では、UラインはD1エリアを超えて伸長し、その終端で超低速ミュオンビーム装置、および負ミュオン原子実験装置を供することになる。

本委員会はこのような設計検討を歓迎するものであるが、一方でまだ多くの課題が残っていることも認識した。しかしながら、スーパーオメガ機器の調達および検収の時間的なスケールを考えれば、この設計検討を完成させることは可能なはずだと考えられる。

実験趣意書 (Letter of Intent)

1.g-2 計画：ミュオン異常磁気能率

この J-PARC に対する新たな実験提案の目標は、ミュオンの異常磁気能率を 10^{-9} というレベルの精度で決定することにある。これにより、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で行なわれた E821 実験における最近の測定 (標準偏差の 3.7 倍のずれが報告されている) から示唆されるような標準理論とのずれの有無を十分な信頼度を持って確かめることが出来る。もしこれが事実であることが証明されれば、数ある素粒子物理の標準理論の可能な拡張に対して一つの実験的な制約を設けることになるであろう。しかしながら、これ自身はどの理論モデルが最も見込みがあるかを同定することにはならないと考えられる。

J-PARC での実験は、BNL が用いた 3 GeV ではなく低エネルギーのミュオン (300 MeV) を用いる、という全く新しい方法によって行なわれることになる。これにより、極めて困難な補正とそれに伴う支配的な系統誤差のある部分を避けることができるという有利さがある。しかしながら、ミュオンビームのエミッタンスに対する要求は現在利用可能なものを超えており、提案をいくらか危ういものになっている。とはいえ、今のところこれを完全に否定するような障害は見つかっていない。

提案はオリジナルなもので、BNL 実験とは全く異なる系統誤差を含む結果をもたらすであろう。なお、フェルミ国立研究所での後継実験では、強度的に改善された 3 GeV ビームを用い、BNL のそれと同じ方法を再利用する予定である。

精力的に行われるべき R&D としては以下の四点が挙げられる：

- ・ レーザーイオン化開発
- ・ 低温ミュオン源
- ・ 加速器
- ・ 蓄積用電磁石と検出器系

超低速ミュオン源は、過去 10 年に渡り KEK-MSL と理研 RAL との共同によって開発されて来たレーザーイオン化に基づいたもので、ISIS 施設において毎秒 20 個の超低速ミュオンを発生するに至っている。ここで理研における高出力紫外パルスレーザーの使用経験は重要であり、和田氏との堅い協力関係が結ばれつつある。というのも、現在の 100 倍のイオン化効率が必要とされるからである。もしこれが実現すれば、理研 RAL 施設で導入・試験が行なわれ、直ちに凝集系物理の研究にとって極めて興味深く、また PSI の直流低エネルギーミュオン源と相補的かつ競争力のある超低速パルスミュオンとなる。

もう一つの要求である低い縦横量方向のエミッタンスについては、(理研 RAL で用いられている高温タングステンではなく) 低温の固体表面から十分なミュオニウムが生成されれば実現され得る。この開発には岩崎グループが責任を負っており、ミュオンビームに関わる同グループの経験、理研で利用可能なナノ材料技術、および国内の他の材料研究グループの経験を活かそうとしている。同グループの能力は、引き受けた責任に十分値するもので、この研究開発を支えるために機関間の協力を推進している。また、よく組織化されており、これら R&D を優先的に行なうために研究プログラム全体の一部見直し等も行なっている。g-2 実験を推進する上で岩崎氏のリーダーシップは国際共同研究チームの中でも高く認められており、J-PARC での同実験プログラムチームは拡大しつつある。このようなミュオン源開発は μ SR を用いる物性材料科学のコミュニティーにとっても高い関心の的である。本委員会としては、g-2 実験が超低速ミュオンビームラインの成功の上に立って行なわれるべきであるとの認識を持つ。一方、g-2 実験のミュオン再加速部分で得られる経験は、提案されているミュオンマイクロビーム等、次世代のミュオンビーム実現にとって有利なものになるであろう。

2. μ N-eN 希少過程

本委員会は、 μ^- から電子への転換、というフレイバー非保存過程を同定するための新しい手法に基づく実験趣意書について、青木氏から説明を受けた。これはミュオン生成標的自体の表面層で崩壊する負ミュオンを利用し、遅れて放出される 105 MeV の電子をビームラインと電子検出器によって捉える、というアイデアである。これは新奇なアイデアであり、ある程度の予備的な実験の結果、実際に遅れて出てくる崩壊電子が程々のバックグラウンドの下で検出されることも確認されている。このアイデアはうまく行くかもしれないが、提案された検出方法の感度を評価することは難しい。現段階ではさらなるシミュレーションおよびバックグラウンド強度の確認が必要であろう。例えば、検出系のアクセプタンスもよく理解されているとは言い難い。趣意書では PSI の測定より実験感度が一桁向上するとされているが、これは封筒の裏に書いた程度の大雑把な見積もりに基づいており、非常に大きな不確定性を伴っている。実験提案を有意義なものにするほど十分な利得があるかどうかは明らかではない。ともに同じ研究者が関わっているという点で、COMET 実験との干渉も考慮されるべきであろう。COMET 実験はこれより遥かに成熟した実験提案であるが、本提案になる手法が中間的な感度のテストとして選択されるとなると、COMET 実験への遅れという影響が懸念される。

3. マイクロビーム工場

永嶺氏は 10-100 MeV というエネルギー領域でのパルス状ミュオンについての実験趣意書の説明を行なった。そのアイデアは、減速されたミュオンビーム（正電荷または負電荷）を RFQ と線形加速器によって 10 MeV まで加速するというものである。ビーム加速に際し、規格化されたエミッタンスは保存されることから、試料位置で 1mm^2 より小さなスポットサイズのビームが得られるかも知れない。後段でさらに高エネルギーへと加速することも出来、応用範囲も幅広い。例えば凝集系物理では、現在の 1-2 GPa という圧力限界を遥かに超えた高圧下の実験が可能になる。生命および産業応用科学におけるミュオンスピン・イメージングや放射線写真技術、さらにミュオン触媒核融合研究もこのようなビームから得られるメリットは大きい。この次世代ビームの開発についてはまだ確たる時間的な見通しは立っておらず、現段階でビームに関わる全ての要素を決定するために詳細なシミュレーションを行ない、その潜在的可能性を十全に評価検討しておくことは極めて有用であろう。そのような状況にあっても、本委員会はこれが興味深いアイデアであって、また g-2 実験が提案しているミュオン加速の構想との相乗効果をも認めるものであり、そのような可能性が追求されるべきものとする。

海外ミュオン施設利用大学共同利用実験

研究活動のハイライト

門野氏は、海外ミュオン施設利用大学共同利用実験（IURP-OMF）についての概略説明、およびミュオン科学研究系の 2007 年度 -2009 年度における研究活動についての報告を行った。

IURP-OMF は J-PARC MUSE の建設期間中、KEK のミュオン科学研究施設での研究活動を維持する目的で 2006 年度から 2008 年度の間実施された。同プログラムでは毎年平均約 30 件の実験課題が採択されたが、これはつくばのブースター利用ミュオン施設（BOOM）での過去の課題数の水準をやや下回る程度であった。この数字は、移行期の研究活動を活発なままで維持する、という同プログラムの主要な目的が果たされたことを示している。研究者は TRIUF、PSI、理研 RAL といった海外施設をバランスよく使っていた。また、研究分野や研究参加者の分布からは、日本の研究機関が幅広くこのプログラムを利用したことが明らかになっている。

本委員会に対しては、様々な分野での研究成果の例が提示された。 μ SR は磁性や超伝導を示す物質材料の研究においてユニークな手法であり、70 % 以上の研究活動がこの二つの分野に関連している。高温超伝導の分野では、東北大、理研のグループが 214 銅酸化物について磁性不純物（ニッケル）あるいは非磁性不純物（亜鉛）がどのように銅スピンの相関に影響を与えるのかについて研究を行なった。その結果、CuO 面の超伝導が抑制されることとニッケルがスピンを持っていることとは無関係であることが明らかになっている。

ミュオンスピン回転は局所磁性や乱れた磁性に対して非常に敏感である。豊田中央研究所のグループはこの特徴を活かし、 Li_xCoO_2 中の CoO_2 三角格子が磁気秩序を示さないことを明らかにした。フィジカル・レビュー・レターズ誌に掲載された結果によれば、モット絶縁体であろうという理論の予想にもかかわらず、 x が三分の一以下の組成の全ての試料が常磁性金属的な振る舞いを示している。これらの材料は二次電池材料として大変興味深い候補であり、この研究は基礎研究と応用との間の有用な橋渡しとなっている。

非磁性基底状態をもつ PrPb_3 におけるミュオンスピンの特異な自発的回転の検出は、超微細相互作用により増強された二つの Pr 核スピンとミュオンスピンによる、磁気双極子相互作用を介した三体束縛系の形成、という発見へと導いた。これはまたフィジカル・レビュー・レターズ誌をはじめ、いくつかの論文成果へと結実している。これら、および提示されたその他の結果は、IURP-OMF プログラムが重要な研究成果をもたらし、J-PARC 建設期間に活発なミュオン科学の研究活動を維持するという所期

の目的を達しつつ終了したことを示している。この点は、2007年度-2009年度に出版された論文数（23編の原著論文および31編の会議録論文）および学位を授与された博士論文、修士論文（各々4編）の数からも明らかであろう。

研究活動のハイライト—門野良典

門野氏は、その発表の後半部分でミュオン物性グループの関わる研究のハイライトを紹介した。同グループは2007年-2009年にかけて、多重ギャップ超伝導（例えば比較的高い転移温度を持つ La_2C_3 や Y_2C_3 ）、新しい鉄系超伝導体、さらには潜在的な水素貯蔵物質中での反応系における水素結合の役割など、ミュオンを基にした幅広い研究を行った。

この仕事により、伝統的に最高の査読付き雑誌であるフィジカル・レビュー・レターズ誌に掲載された論文3編を含む、顕著な数の論文（全部で32編）がもたらされている。それらのうちの一編は最近発見されたCo置換の鉄系超伝導体についてのもので、同物質中の相分離状態を確立したものである。CaFeAsFは低温で磁性を示すが、10%ほどの鉄をコバルトで置換することで超伝導を示すようになる。CaFeAsFでの置換はコバルト原子の周りが超伝導になるという効果（銅酸化物におけるニッケルや亜鉛と逆）をもたらし、そのような超伝導の島々を磁性相の海が取り囲む。

これは、世界中で熱狂的な研究活動を引き起こした鉄系超伝導体の一系統についての時期を得た研究である。当該物質についてのこの論文はネイチャー・アジア・オンラインで取り上げられ、査読付き雑誌上で公開された論文の中ではJ-PARCで行なわれた実験を含む最初のものとなったようである。全体として、同グループが過去三年間に行なった研究は、凝集系物理や他の研究コミュニティが大きな関心を寄せていた分野に焦点を当てている。これに加えて、この期間の研究成果の水準は、世界トップの μSR 研究者と肩を並べるものである。

研究活動のハイライト—三宅康博

三宅氏は、ISIS施設内の理研RALミュオン施設にあるポート3で行なわれている超低速ミュオンビームプロジェクトについて、このビームを用いたマンガン磁性薄膜 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ についてのプロトタイプ実験で得られた最初の結果を含む研究の概説を行なった。理研メンバーとの協力の下、ミュオン科学研究系のグループは彼らのオリジナルの手法であるレーザー共鳴イオン化法によって超低速ミュオンビームを生成することに成功している。この手法の有利な点は、高い時間分解能、小さなビームスポット径、およびミュオン注入に際してのエネルギー可変性である。彼らは既に半値全幅で約9 nsというパルス幅、および試料位置で 3.3×4.1 mm四方のビームサイズ(ビ

ームエネルギーが 9 keV の場合)、さらに注入エネルギーの範囲も 1-18 keV で 10 nm の深さ方向分解能を実現している。さらに、信号対雑音比も約 250 倍の改善が見られている。彼らはこの実験装置を用い、80 nm 厚の $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ 薄膜における逐次的な相転移の研究を行った。その結果、常磁性絶縁体相、強磁性金属相、および電荷秩序絶縁体相という三つの異なる相を示すそれぞれの温度領域において、得られた μSR スペクトルの初期非対称度が著しい変化を示すことを見いだした。この冒険的な実験は、現状の毎秒 20 個という限られたビーム強度にもかかわらず十分成功しており、もしこのシステムが J-PARC に導入されて毎秒 10^5 個という期待される強度を発揮すればパルス状超低速ミュオンビームが様々な分野で応用可能であることを証明している。

研究活動のハイライト—下村浩一郎

下村氏とそのグループは、半導体研究に対して μSR 法を用いての興味深い寄与を行なって来た。半導体技術において水素不純物の役割に関する情報は大変重要であり、 μSR のみがそのような情報をもたらす。GaN や ZnO に加え、 TiO_2 中でもミュオニウムが浅いドナー準位にあることが実験により明らかにされ、水素不純物の重要性が再確認された。半導体中のアクセプターとしての窒素不純物の役割を微視的に理解するために、負ミュオンスピン回転 ($\mu^- \text{SR}$) も応用された。これらの研究では、ミュオン原子 (ミュオン-酸素のような) を用いることにより重要で実りある情報がもたらされる。同グループにより開発されたレーザー技術を利用することで、GaAs 中の偏極電子とミュオニウムのスピン依存相互作用の観測など、新たな研究の道も開けつつある。

研究活動のハイライト—河村成肇

河村氏は低速負ミュオンに関する発表を行なった。J-PARC のエネルギーでは、 π 中間子 (従って μ^- も) の生成断面積が他の既存施設におけるそれより大きい。一方、非常に低速の負ミュオンを生成しようとする上で、正電荷を持つ場合に利用される手法 (冷凍減速法、およびレーザーイオン化) は機能しない。一つの可能性は、(PSI で実証されたように) サイクロトロン捕獲装置中で負ミュオンを減速した後に取り出し、さらに「摩擦冷却」により負ミュオンビームを冷却するというものである。現在のところ、J-PARC における低速負ミュオンプロジェクトはその揺籃期にある。ビームライン設計のためのモンテカルロシミュレーションが進行中であり、ガス電子増幅検出器 (GEM) を用いて入射ビームの位相空間を決めるといった予備的なテスト実験が行なわれている。テスト実験では、必要とされる空間分解能を GEM 検出器が持っていることが確かめられた。河村氏からは、この検出装置をさらに発展させる上で KEK エレクトロニクスシステムグループとの協力が不可欠であることが強調された。

研究活動のハイライト—ストラッサー・パトリック

ストラッサー氏は、固体重水素中に注入された希土類およびアルカリ土類イオンへのミュオン移行反応に関する研究を報告した。このプロジェクトの最終目的は、放射性同位体元素のミュオン原子を生成することである。これにより、例えば不安定原子核の電荷分布および変形の様子を測定することが可能になる。安定同位体を用いたテストが理研 RAL 施設で行なわれ、トレーサーレベルの濃度のストロンチウム核へのミュオン移行に伴う X 線が明瞭に観測された。放射性核での最初の実験はおそらく理研 RAL で実現するであろう。本委員会はこれらの結果に興味を持つと同時に、J-PARC での応用の可能性は理研 RAL での実験結果次第であろうと考える。

研究活動のハイライト—幸田章宏

本委員会は、J-PARC で最初に稼働した μ SR 分光器 (D1 ビームラインに設置) のために用意されたデータ収集システムの開発と導入、および陽子ビーム出力 300 kW での運転時における同システムのパフォーマンスについての概要説明を受けた。また、安価で高利得、なおかつ磁場に影響を受けない多重ピクセル光子検出器 (MPPC) の応用についての報告も受けた。本委員会は、これら技術開発が革新的でかつ成功していると認めるものである。

発表の残りの部分は、応用技術上重要でかつ学術的にも興味深いマルチフェロと呼ばれる一群の物質について、それらが示すスピンドイナミクスを μ SR で研究した結果の報告があった。これらの物質では、電気磁気効果が発現するために時間反転対称性および空間反転対称性の両方が破れている必要がある。ここで特に研究対象となったのは TbMnO_3 という物質で、42 K、27 K、7 K と温度を下げるにつれて逐次的に磁気的および電氣的な転移を示すものである。

2009 年に TRIUMF で縦磁場 μ SR の測定が行なわれ、他の実験で明瞭な転移が確認されているにもかかわらず、転移温度を超えてマルチフェロ相までの全温度領域でスピン揺らぎが観測された。三桁にわたって測定されたスピン揺らぎの振動数は、ほぼ全温度領域にわたりアレニウス型の振る舞いを示している。バルク測定で見られる電気・磁気相の発達と、観測されたスピン揺らぎがどのように整合するのかは今後を待つしかないが、本委員会は実験が大変に興味深いもので、それがマルチフェロ的な振る舞いという注目の課題について新しい知見をもたらすものと信じる。

ミュオン科学研究系の研究活動に対するコメント

査読付き論文誌への出版という基準に鑑み、ミュオン科学研究系の研究成果の水準は J-PARC MUSE の建設期間中も維持されていたといえる。とりわけ、本委員会は比較的小さなグループによって推進された研究の多様性、また将来技術的な応用で重要になる可能性を持つ物質材料に関する実験への取り組みに強く印象づけられた。いくつかの研究プロジェクトでは高い時間分解能を必要とし、これらの研究活動を維持するために海外の直流ビーム源を用い続ける必要があるだろう。しかしながら、J-PARC MUSE 建設期間中に維持された研究活動は、そのまま切れ目なく新しい施設での研究活動へと包含されていくことが可能であるに違いない。我々は、この研究プログラムに関わったグループの研究活動の大部分が MUSE 施設でミュオン利用の可能性が広がることによる恩恵を受けると確信するものである。

本委員会は、特にグループの一部が同時に MUSE 建設に関わっていたことを考慮すると、これら研究成果が全体として高い質と広いスペクトルを持つことに感銘を受けた。

委員会構成：

秋光 純	青山学院大学
網塚 浩	北海道大学
R. Cywinski	Huddersfield 大学
E. Morenzoni	PSI 研究所、スイス（委員長）
J.-M. Poutissou	TRIUMF 研究所、カナダ
篠原 厚	大阪大学
J. E. Sonier	Simon Fraser 大学
鳥養 映子	山梨大学

