

永なが
嶺みね
謙かへ
忠ただ



專攻学科目
生年
略歴

[illegible]

· 物質生命地球科学

東京大学工学部応用物理学科卒業

東京大学大学院理学系研究科修士課程修了

東京大学工学部助手

理学博士

東京大学理学部助手

東京大学理学部助教授

理化学研究所ミユオン科学研究室主任研究員（兼務）

東京大学理学部教授

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所教授（兼務）

総合研究大学院大学教授（兼務）

東京大学大学院理学系研究科教授（兼務）

東京大学名誉教授

理化学研究所客員研究員（平成二九年三月まで）

理化学研究所名誉研究員

米国カリフォルニア大学リバーサイド校物理研究員（平成二九年七月まで）

高エネルギー加速器研究機構名誉教授

総合研究大学院大学名誉教授

山梨大学客員教授（現在に至る）

理学博士永嶺謙忠氏の「ミュオンラジオグラフィ」の開拓と大規模構造体の非破壊的研究」に対する授賞審査要旨

理学博士永嶺謙忠氏は、素粒子ミュオンのビーム生成と利用において独自の研究領域を開拓するとともに、高エネルギーミュオンビームを使うラジオグラフィを創始するなど、ミュオンを用いる学際的科学を総合的に発展させ、ミュオン科学の開拓的研究に多大な貢献をなした。

(1) 高エネルギーミュオンによるラジオグラフィの創始と展開

水平近くに飛来する高エネルギー（ギガ電子ボルト以上）の宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィ法を創始し、火山体等地球科学規模の巨大物体の内部構造の探索を可能にし、自然災害予知への道をひらいた。かつては、Alvarez等によるピラミッド探索（一九七〇年）が知られていたが、真上からくる垂直宇宙線ミュオンを用いていたので、噴火している火山体にトンネルを掘って測定器を導入することは不可能であった。永嶺氏らは水平方向の宇宙線ミュオ

ン強度を非破壊的に測定することに初めて成功した「1、9、10」。低いミュオン頻度の計測利用と高いバックグラウンド放射線を低減させるための装置が開発され、外部から侵入した宇宙線ミュオンの経路ごとの密度長分布から、火山体の噴火道の透過像がオンラインで得られ、年・月にわたる長期間の時系列観測から火山体の活動状況の経時変化を知るのに成功した。この方法は地震・火山に伴う地球内部の探査研究に新しくユニークな手段を提供することになり、内外の多くの研究者により火山の噴火と予知の研究に使われるようになった。（例えば、最近の研究として N. Lesparre *et al.*, *Geophys. J. Int.* **190**, 1008-1019 (2012); T. Kusagaya and H. K. M. Tanaka, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **91**, 501-510 (2015)。

(2) 宇宙線ミュオンラジオグラフィの巨大危険機器内部探索への適用

一般にミュオンラジオグラフィの方法は、火山体の活動状況の検知のように、人間が立ち入ることができない場所にある重要な構造物の非破壊的内部探索などに極めて有効である。永嶺氏らは、古くから「溶鉱炉の火を絶やすな」と言われて来た製鉄所高炉の内部探索を行い、高炉外壁のレンガ耐熱壁の摩耗状態を非破壊的に調べた事に挑んだ。その結果、時系列的データ処理により、それまでの

高炉運転に代わり、炉内溶融鉄の挙動を非破壊的にモニターして合理的に制御運転できる事を明らかにした「4、9、10」。

(3) 宇宙線ミュオンラジオグラフィの原子炉内部探索への利用

当然のことながら、永嶺氏は二〇一一年三月の福島第一原子力発電所の重損傷事故の直後にいち早く、破損原子炉の内部探索を、強い放射線バックグラウンドの下で非破壊的に行い、事故の詳細を調べる事を提言した「1」。原子炉内の炉心棒の所在を外部から検知出来る事が示された。原子炉事故への適用については、福島第一原発の重損傷事故の解明、溶融燃料棒の所在の解明等に貢献している。これこそは、宇宙線ミュオンの非破壊的方法が最も威力を発揮する場面である。

(4) 超低速ミュオンビームの実現と新しい素粒子物理・物質科学への展開

永嶺氏は、これらの巨大構造物への応用と平行して、新しい実験手法の開発によってミュオンの新しい物質科学への適用 (NMR (Nuclear Magnetic Resonance; 核磁気共鳴) に対応する μ SR (ミュオンスアール) 等) を目指した研究を以下に行っている「6」。

一九七五年、高エネルギー物理学研究所 (現・高エネルギー加速

器研究機構) にブースター陽子シンクロトロンが誕生して以来、同氏は、パルス状ビームは役に立たないとの一般的風潮に抗して、誰も見向きもしないパルス状ミュオンビームの装置群を創造し、世界で初めてミュオンと同期するもろの極端現象を解明する諸実験を主導した「2、15、16」。ミュオンの平均寿命より遙かに長時間にわたる物質中のミュオン、ミュオニウムの量子拡散、遅延崩壊現象の観測、ミュオンがもたらす電子伝達による新しい物質生命科学現象「5、8、14」の解明などを行った。特に注目されたのは、メガ電子ボルトの正ミュオンを高熱金属に止め、表面から熱エネルギーの正ミュオンと電子の束縛状態 (ミュオニウム II 軽い水素原子) が蒸発する現象を発見したこと「13」、さらにパルス状に生成するミュオニウムの束縛電子をパルス状大強度レーザーで分離するアイデアを実現させ量子電気力学の検証を行ったことである「12」。

この実験にはノーベル物理学賞受賞者の Steven Chu 博士 (スタンフォード大学教授) が共鳴して参加した。加えて、超低速 (キロ電子ボルト以下) パルス状正ミュオンを発生させる方法 (ミュオニウム・ライマン・アルファ多重レーザー共鳴法) を確立した「2、11」。このビームは、物質表面・界面の物性研究に、かつてない新しい観測手段の提供を可能にした。同時に、ミュオンの異常磁気能率測定や四重極能率の測定等の素粒子物理実験に道を開いている。

(5) 素粒子ミュオンを用いた先駆的原子核エネルギーの基礎応用科学

ミュオン触媒核融合の実験手法の開発と新しい原子力エネルギーの提案を行い、実験を推進している「3、7」。また、加速器からの負ミュオンによる元素変換法の開発と医用放射線源・原子炉放射性廃棄物処理等の全く新しい方法を提案している。

(6) ミュオン科学研究施設の建設、コミュニティの構築と科学研究の主導

永嶺氏は東大理学部の助手の時代から国内外の大型加速器を活用して次の事を成し遂げた。(1) KEK (つくば)・RAL (イギリス)・J-PARC (東海) におけるパルス状ミュオン実験施設、TRIUMF (カナダ) における直流状ミュオン実験施設を、大型超電導磁石を用いて実現した。(2) パルス状加速器ミュオンを用いる研究者集団や高エネルギー宇宙線ミュオンを用いる研究者集団を育成した。

このように永嶺氏はミュオンのもつあらゆる魅力ある特質に注目し、超低温から高エネルギーまでのミュオン利用を開拓し、ユニークな学際的科学の発展に貢献してきた。学術的論文の多くは日本学士院欧文紀要 *Proceedings of the Japan Academy, Series B* にも発表されている。同氏の業績はすべて独自の発想に基づいていて、先例は

無い。

代表的論文・著書（一六編／他約六〇〇編）

1. K. Nagamine, Radiography with Cosmic-Ray and Compact Accelerator Muons: Exploring Inner-Structure of Large-Scale Objects and Landforms, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **92**, 265–289 (2016).
2. K. Nagamine, Past, Present and Future of Ultra-Slow Muons, *JPS Conf. Proc.* **2**, 010001 (2014).
3. K. Nagamine, Muon-Catalyzed Fusion (μ CF) (Chapter 11). In: K. Heinloth (ed.) *Nuclear Energy*, Landolt-Börnstein: Group VIII Advanced Materials and Technologies (Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology), Vol. 3B, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 555–602
4. K. Nagamine, H. K. M. Tanaka, S. N. Nakamura, K. Ishida, M. Hashimoto, A. Shinotake, M. Naito and A. Hatanaka, Probing the Inner Structure of Blast Furnaces by Cosmic-Ray Muon Radiography, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **81**, 257–260 (2005).
5. K. Nagamine and E. Torikai, Electron Transfer in Proteins and DNA Probed by Muon Spin Relaxation, *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, S4797–S4806 (2004).
6. K. Nagamine, Introductory Muon Science. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
7. N. Kawamura, K. Nagamine, T. Matsuzaki, K. Ishida, S. N. Nakamura, Y. Matsuda, M. Tanase, M. Kato, H. Sugai, K. Kudo, N. Takeda and G. H. Eaton, Discovery of Temperature-Dependent Phenomena of Muon-Catalyzed Fusion in Solid Deuterium and Tritium Mixtures, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 043401 (2003).
8. K. Nagamine, F. L. Pratt, S. Ohira, I. Watanabe, K. Ishida, S. N. Nakamura and T. Matsuzaki, Intra- and Inter-Molecular Electron Transfer in Cytochrome c and Myoglobin Observed by the Muon Spin Relaxation Method, *Phys. B (Amster-*

- dam, Neh.* **289-290**, 631-635 (2000).
9. K. Nagamine, M. Iwasaki, K. Shimomura and K. Ishida, Method of Probing Inner-Structure of Geophysical Substance with the Horizontal Cosmic-Ray Muons and Possible Application to Volcanic Eruption Prediction, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **356**, 585-595 (1995)
10. K. Nagamine, Geo-Tomographic Observation of Inner-Structure of Volcano with Cosmic-Ray Muons, *J. Geography* **104**, 998-1007 (1995) [in Japanese].
11. K. Nagamine, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Birrer, J. P. Marangos, M. Iwasaki, P. Strasser and T. Kuga, Ultraslow Positive-Muon Generation by Laser Ionization of Thermal Muonium from Hot Tungsten at Primary Proton Beam, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4811-4814 (1995).
12. S. Chu, A. P. Mills, Jr., A. G. Yodh, K. Nagamine, Y. Miyake and T. Kuga, Laser Excitation of the Muonium 1S-2S Transition, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 101-104 (1988).
13. A. P. Mills, Jr., J. Imazato, S. Saitoh, A. Uedono, Y. Kawashima and K. Nagamine, Generation of Thermal Muonium in Vacuum, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1463-1466 (1986).
14. K. Nagamine, K. Ishida, T. Matsuzaki, K. Nishiyama, Y. Kuno, T. Yamazaki and H. Shirakawa, Solitons in Polyacetylene Produced and Probed by Positive Muons, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1763-1766 (1984).
15. K. Nagamine, H. Nakayama, J. Imazato, Y. Kuno, M. Fujiwara, A. Yamamoto and T. Yamazaki, Superconducting Solenoid and its Cooling System for Pulsed Muon Channel, *IEEE Trans. Magn.* **17**, 1882-1885 (1981).
16. K. Nagamine, Pulsed μ SR Facility at the KEK Booster, *Hyperfine Interact.* **8**, 787-795 (1981).