

「特別推進研究」研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する自己評価書

- 研究代表者氏名 富岡 秀雄（三重大学・工学部・名誉教授）
- 研究分担者氏名 高橋 康文（三重大学・工学部・助教授）
平井 克幸（三重大学・生命科学研究支援センター・助教授）
- 研究課題名「三重項有機分子の安定化とその複合化による磁性分子素材の構築」
- 課題番号 12002007
- 補助金交付額（直接経費のみ）

平成12年度	56,000 千円
平成13年度	63,000 千円
平成14年度	50,000 千円
平成15年度	36,000 千円
平成16年度	12,000 千円

【研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する内容】

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか。

(1) 概要

研究代表者は、平成17年3月末日本特別推進研究の終了と同時に三重大学を定年退職し、同年4月から愛知工業大学工学部の客員教授（非常勤）をつとめている。愛知工業大学では独立した研究室はなく、応用化学科の立木次郎教授の研究を支援しているが、研究課題は特別推進とは無関係であり、自身による研究の進展はない。研究分担者の一人である平井克幸准教授が、小規模ではあるが、本研究を継続させているので、ここでは、彼との共同研究の成果を紹介させて頂く。

本研究は（1）三重項という有機分子としては例外的に高いスピンを持つが、非常に不安定な三重項カルベンを安定化し、（2）それをユニットとした磁性分子素材を構築することを目的とした研究である。

最初に目的（1）に関しては、研究期間中に室温溶液中で約1週間も存在できるという、三重項カルベンとしては非常に安定なものの創成に成功している。ただ、このカルベンはカルベンの持つ対電子が分子内に広く非局在化しており、目的（2）を達成するための磁性材料のユニットとしては好ましくない。そこで、非局在化の小さいジフェニルカルベン系の安定化を主に行ってきた。その結果、トリフルオロメチル基、ヨード基などの新しい保護基を使うことによって、ジフェニルカルベン系でも室温、溶液中で半減期1日という長寿命化に成功した。また保護基としてパラ位から置換基を羽のように延ばし、カルベン中心まで覆い被せる手法の開発にも着手し、一応の成果を得ている。この手法はジアゾ基を導入した後で保護基を導入できるので、さまざまな置換基を用いることが可能であり、今後の展開が期待される。一方、ホスト内に取り込ませ、安定化する研究にも着手し、無機ホスト分子であるモレキュラーシーブ（MS）を用いた安定化を検討した。前駆体のジアゾ化合物がMS内の酸性サイトと反応するので、分解せずに取り込ませることが困難で、多くの系での検討はできていないが、かなり有望な手法であることを見いだしている。

目的（2）に関しては、一般には不安定な前駆体ジアゾ化合物が、カルベン中心を保護する

ために導入したオルト位の置換基によって保護され、非常に安定化していることを見だし、これまでにさまざまなポリジアゾ化合物を合成し、その光分解によってポリカルベンを発生させ、多重度の解析を行ってきた。このように目的を達成する手法は確立されたのではあるが、様々な要因から、なかなか高いスピン多重度を持つポリカルベンを得ることができないという問題が残った。問題となった要因の一つであるカルベン中心を連結するリンカーとの連結性 (Connectivity) の不適合は、カルベンとリンカーとの間に新しいカルベン中心を導入することによって解決できることを見いだした。金属のスピンを利用したヘテロスピン系の構築に関しては、カルベン中心と金属との間に長い π 系が存在し、相互作用が弱められていたが、この問題を解決できる系としてピリジル系およびアクリジニル系の安定三重項カルベンの発生に成功した。今後これらのカルベンを用いて、ヘテロスピン系を開発する予定である。

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など

論文発表

- T. Itoh, M. Matsuno, S. Ozaki, K. Hirai, H. Tomioka, "Preparation of a Copper Ion Complex of Sterically Congested Diphenyldiazomethanes Having a Pyridine Ligand and Characterization of Their Photoproducts", *J. Phys. Chem. B*, **109**, 20763-20772 (2005).
- S. Hashimoto, M. Saitoh, N. Taira, W. Schmidt, K. Hirai, H. Tomioka, "Emission Spectroscopic Investigation of Triplet Diarylcarbene Generated in Molecular Sieve VPI-5", *J. Phys. Chem. B*, **109**, 20407-20414 (2005).
- Y. Tsuchiya, T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, "A Tris(carbene) Consisted with Stable Triplet Carbene Units", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **78**, 2037-2050 (2005).
- T. Enyo, N. Arai, N. Nakane, A. Nicolaidis, H. Tomioka, " σ -Phenylene Halocarbenonitrenes and σ -Phenylene Chlorocarbenocarbene: A Combined Experimental and Computational Approach", *J. Org. Chem.*, **70**, 7744-7754 (2005).
- M. Matsuno, T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, "Preparation of Sterically Congested Diphenyldiazomethanes Having a Pyridine Ligand and Magnetic Characterization of Photoproducts of Their 2:1 Copper Complexes", *J. Org. Chem.*, **70**, 7054-7064 (2005).
- K. Hirai, E. Kamiya, T. Itoh, H. Tomioka, "A Dendrimer Approach to High-Spin Polycarbenes. Conversion of Connectivity from Disjoint to Non-Disjoint by Perturbation of Nonbonding Molecular Orbital Coefficients", *Org. Lett.*, **8**, 1847-1850 (2006).
- T. Itoh, Y. Nakata, K. Hirai, H. Tomioka, "Triplet Diphenylcarbenes Protected by Trifluoromethyl and Bromine Groups. A Triplet Carbene Surviving a Day in Solution at Room Temperature", *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 957-967 (2006).
- M. Kawano, K. Hirai, H. Tomioka, Y. Ohashi, "Structure Determination of Triplet Diphenylcarbenes by *In Situ* X-Ray Crystallographic Analysis", *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 2383-2391 (2007).
- T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, "From Persistent Triplet Carbenes to Persistent High-Spin Polycarbenes", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **80**, 138-157 (2007).
- H. Tomioka, N. Nakane, J. Tatsugi, "1- and 3-Nitreno-2-naphthylcarbenes. A Combined Experimental and Computational Study", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **81**, 1629-1637 (2008).
- K. Hirai, T. Itoh, H. Tomioka, "Persistent Triplet Carbenes", *Chem. Rev.*, **109**, 3275-3332

(2009).

・富岡秀雄、”最新のカルベン化学”、名古屋大学出版会 (2009).

・K. Hirai, K. Bessho, T. Kitagawa, H. Tomioka, “Triplet Diphenylcarbene Protected by Iodine and Bromine Groups”, *J. Phys. Org. Chem.*, **23**, 347-356 (2010).

国際会議での招待講演

・M. Kawano, K. Hirai, Y. Ohashi, H. Tomioka (Invited Lecture) “Structure Determination of Triplet Diphenylcarbenes by *In Situ* X-Ray Crystallographic Analysis” Reactive Intermediates and Unusual Molecules, 2005 (ISRIUM 2005) (August, 7-12, 2005) Edinburgh, United Kingdom.

・T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka (Invited Lecture) “Persistent Polycarbenes Prepared by Using Persistent Triplet Carbenes”, The 11th Kyushu International Symposium on Physical Organic Chemistry (KISPOC-11) (September 12-15, 2005) Fukuoka, Japan.

・T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka (Invited Lecture) “From Persistent Triplet Carbenes to Persistent High-Spin Polycarbenes”, Symposium on Reactive Intermediates and Unusual Molecules, Pacificchem 2005 (December 15-20, 2005) Honolulu, Hawaii, USA.

・A. Nicolaidis, H. Tomioka (Invited Lecture) “Computational and Spectroscopic Studies on Structures and Reactivities σ -Phenylenebis(diradicals)”, Symposium on Organic Photochemistry - Reactions and Mechanisms, Pacificchem 2005 (December 15-20, 2005) Honolulu, Hawaii, USA.

・K. Hirai, H. Tomioka (Invited Lecture) “From Persistent Triplet Carbenes to Persistent High-Spin Polycarbenes”, Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience, (November 22-25, 2007) Gyeongju, Korea.

・T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka (Invited Lecture) “Persistent Triplet Carbenes. What's New? ”, The 2009 International Symposium on Reactive Intermediates and Unusual Molecules (ISRIUM2009) (July 5-10, 2009) Liblice, Czech Republic.

(3) 研究費の取得状況 (研究代表者として取得しているもののみ)

単年度当たり 1,000 万円以上の研究費は取得していないが、科学研究費補助金の基盤研究(C) 「ビス (ジラジカル) 芳香族系分子の構造と反応性の相関. 開殻 π 電子系の有機反応論の展開」 「2006-2008」 「3,840,000 円」 を獲得している。

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

さまざまな構造のカルベン前駆体をほぼ望むままに合成できるようになったことは大きな知見である。今後、この手法を用いて、さまざまな展開が可能である。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者による活用された状況はどうか。

(1) 学界への貢献の状況

本研究の学界への最大の貢献は、物理有機化学というきわめて狭い学術的な分野にのみ留まっており、化学の分野でも余り注目されていなかった非常に不安定な化学種、三重項カルベンでさえも、材料の分子素材として利用できるまでに安定化できる可能性があることを明示した

点であろう。こういう切り口の研究は皆無ではないが、これほど不安定な化学種までもが化学的手法によって安定化できることを示したことは、さまざまな点で学界を刺激できたと思っている。これに関連して2008年には特定領域研究「元素相乗系化合物の化学」第3回公開シンポジウムで、学術研究を行う若い研究者への研究の道しるべを示すものとして特別講演を依頼された。また、この研究で得られた成果をもとに、「最新のカルベン化学」(名古屋大学出版会、347頁)という本を2009年に上梓した。これはこれから基礎研究を背負っていく大学院生、若手研究者を対象として書き下ろしたもので、多くの研究者に高く評価されており、すでに100以上の大学図書館で蔵書、活用されている。

ただ、もともと研究人口の少ない特殊な分野の研究であるので、学界全体への影響はきわめて限定的である。例えば、最もインパクトの大きいNatureに発表された論文でさえ、その被引用回数は45回であった。現在の時点では、他の研究分野の研究者の興味を引くテーマにまでは育っていないことを示すともいえる。

限られた分野ではあるが、研究期間中は多くの国際会議で招待講演を行っており、国際的に注目を集めていることは明白である。研究終了後も多くの招待を受けたが、退職に伴うさまざまな制約もあり、一部しか実現できなかったことは誠に残念である。研究期間中に代表者がオーガナイザーとなって2001年に開催したISRIUM (International Symposium on Reactive Intermediates and Unusual Molecules)は、その後この分野の国際会議として根付き、世界各国で定期的開催されるようになった。会議のトピックスは必ずしも三重項カルベンに絞った会議ではないが、関連分野の研究者が定期的集まるきっかけになると共に、我々の研究の動向はこの会議でも常に注目を集めている。

(2) 論文引用状況

調査日 2010年4月20日

研究期間中に発表された論文

・ H. Itakura, H. Mizuno, K. Hirai, H. Tomioka, "Generation, Characterization and Kinetics of Triplet Di[1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,4:5,8-di(ethano)anthryl]carbene", *J. Org. Chem.*, **65**, 8797-8806 (2000). (炭化水素からのみ構成される三重項カルベンで最も安定なものを見いだした) 被引用数: 11

・ Y. Takahashi, M. Tomura, K. Yoshida, S. Murata, H. Tomioka, "Triplet Di(9-anthryl)carbene Undergoes Trimerization", *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **39**, 3478-3480 (2000). (三重項カルベンの分解経路として三量化という前例のない経路を証明した) 被引用数: 21

・ H. Itakura, H. Tomioka, "Generation and Characterization of Triplet Anthryl(aryl)carbene", *Org. Lett.*, **2**, 2995-2997 (2000). (三重項カルベンを安定化する置換基として、アントリル基が優れていることを明らかにした) 被引用数: 13

・ H. Tomioka, E. Iwamoto, H. Itakura, K. Hirai, "Generation and Characterization of a Fairly Stable Triplet Carbene", *Nature*, **412**, 626-6 (2001). (この時点では最も安定な半減期が1時間近い三重項カルベンを創成した) 被引用数: 45

・ M. Kawano, K. Hirai, H. Tomioka, Y. Ohashi, "Structure Analysis of a Transient Triplet Carbene Trapped in a Crystal", *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 6904-6908 (2001). (三重項カルベンのX線結晶構造を初めて明らかにした) 被引用数: 26

- ・ A. Nicolaides, T. Enyo, D. Miura, H. Tomioka, "p-Phenylenecarbenonitrene and its Halogen Derivatives. How Does Resonance Interaction Between a Nitrene and a Carbene Center Affect the Overall Electronic Configuration?", *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 2628-2636 (2001). (2個のアジカル中心をベンゼン環を通して相互作用させた系の基底状態多重度と構造の関係を説明した) 被引用数: 15
- ・ H. Tomioka, Y. Hu, Y. Ishikawa, K. Hirai, "Spectroscopic and Product Studies of the Effect of para Substituents on the Reactivity of Di(2,6-dimethylphenyl)carbenes", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **74**, 2207-2218 (2001). (三重項ジフェニルカルベンの電子構造に対するパラ位の置換基の効果を解析した) 被引用数: 14
- ・ K. Hirai, T. Iikubo, H. Tomioka, "Effects of para-Phenyl Group on the Reactivities of Sterically Congested Triplet Diphenylcarbene", *Chem. Lett.* 1226-1227 (2002). (三重項ジフェニルカルベンがパラ位の置換基によっても安定化することを見いだした) 被引用数: 10
- ・ E. Iiba, K. Hirai, H. Tomioka, Y. Yoshioka, "Di(triptycyl)carbene. A Fairly Persistent Triplet Dialkylcarbene", *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 14308-14309 (2002). (非常に安定な三重項ジアルキルカルベンを創成した) 被引用数: 10
- ・ T. Enyo, A. Nicolaides, H. Tomioka, "Halogen Derivatives of m-Phenylenecarbenonitrene: A Switch in Ground-State Multiplicity", *J. Org. Chem.* **67**, 5578-5587 (2002). (2個のアジカル中心をベンゼン環のメタ位で連結した系の基底状態多重度が置換基によってスイッチできることを明らかにした) 被引用数: 10
- ・ S. V. Chapyshev, H. Tomioka, "Photochemical Transformations of Quintet m-Phenylenedinitrenes", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **76**, 2075-2089 (2003). (Best manuscript of the issue) (極低温でも5重項ジナイトレンが光分解することを見だし、その経路を説明した) 被引用数: 26
- ・ E. Iwamoto, K. Hirai, H. Tomioka, "Triplet Carbene Surviving a Week in Solution at Room Temperature", *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 14664-14665 (2003). (半減期が1週間以上というほぼ安定な三重項カルベンを創成した) 被引用数: 29
- ・ T. Itoh, T. Maemura, Y. Ohtsuka, Y. Ikari, H. Wildt, K. Hirai, H. Tomioka, "Synthesis of Phenylacetylene Dendrimers Having Sterically Congested Diazo Units and Characterization of Their Photoproducts", *Eur. J. Org. Chem.*, 2991-3003 (2004). (安定な三重項カルベンを構成ユニットとして持つ安定な高スピンポリカルベンを創成した) 被引用数: 10
- T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, "Preparation of Oligodiazo Compounds by Using Suzuki Coupling Reaction and Characterization of Their Photoproducts", *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 1130-1140 (2004). (安定な三重項カルベンをユニットとした高スピンオリゴカルベンを合成する新しい手法を開発した) 被引用数: 16
- ・ Y. Ohtsuka, T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, T. Takui, "Quintet Bis(carbene) from Triplet Diarylcarbenes Introduced on 1, 8 Position of Anthracene", *Org. Lett.*, **6**, 847-850 (2004). (アントリル基を高スピンポリカルベンを構築するリンカーとして利用できることを示した) 被引用数: 12
- ・ K. Monguchi, K. Hirai, T. Itoh, H. Tomioka, "Triplet Diphenylcarbenes Protected by σ -Aryl Groups", *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 11900-11913 (2004). (保護基としてアリアル基をもつ三重項ジフェニルカルベンを初めて発生し、安定性を検討した) 被引用数: 11
- ・ T. Itoh, Y. Jinbo, K. Hirai, H. Tomioka, "Preparation of Poly(phenyl)acetylenes Having

Diazo Groups and Magnetic Characterization of Poly(carbene)”, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 1650-1651 (2005). (安定な三重項カルベンをユニットとした高スピンオリゴカルベンを合成する新しい手法を開発した) 被引用数: 15

研究期間終了後に発表された論文

・ T. Itoh, M. Matsuno, S. Ozaki, K. Hirai, H. Tomioka, “Preparation of a Copper Ion Complex of Sterically Congested Diphenyldiazomethanes Having a Pyridine Ligand and Characterization of Their Photoproducts”, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 20763-20772 (2005). (金属イオンのスピンと三重項カルベンを併用して高スピンポリカルベンを構築する手法を報告した) 被引用数: 3

・ S. Hashimoto, M. Saitoh, N. Taira, W. Schmidt, K. Hirai, H. Tomioka, “Emission Spectroscopic Investigation of Triplet Diarylcarbene Generated in Molecular Sieve VPI-5”, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 20407-20414 (2005). (無機ホストであるモレキュラーシーブ内に三重項カルベンを初めて閉じこめ、安定化効果を見いだした) 被引用数: 2

・ Y. Tsuchiya, T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, “A Tris(carbene) Consisted with Stable Triplet Carbene Units”, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **78**, 2037-2050 (2005). (安定な三重項カルベンを3個ベンゼン環に並べることに成功し、安定性と多重度を解析した) 被引用数: 2

・ M. Matsuno, T. Itoh, K. Hirai, H. Tomioka, “Preparation of Sterically Congested Diphenyldiazomethanes Having a Pyridine Ligand and Magnetic Characterization of Photoproducts of Their 2:1 Copper Complexes”, *J. Org. Chem.*, **70**, 7054-7064 (2005). (金属イオンのスピンと三重項カルベンを併用して高スピンポリカルベンを構築する手法を報告した) 被引用数: 3

・ K. Hirai, E. Kamiya, T. Itoh, H. Tomioka, “A Dendrimer Approach to High-Spin Polycarbenes. Conversion of Connectivity from Disjoint to Non-Disjoint by Perturbation of Nonbonding Molecular Orbital Coefficients”, *Org. Lett.*, **8**, 1847-1850 (2006). (低スピン状態しかとれないポリカルベンを、高スピン状態に変換する分子修飾の手法を示した) 被引用数: 6

・ T. Itoh, Y. Nakata, K. Hirai, H. Tomioka, “Triplet Diphenylcarbenes Protected by Trifluoromethyl and Bromine Groups. A Triplet Carbene Surviving a Day in Solution at Room Temperature”, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 957-967 (2006). (三重項ジフェニルでは最も安定なものを創成した) 被引用数: 13

・ M. Kawano, K. Hirai, H. Tomioka, Y. Ohashi, “Structure Determination of Triplet Diphenylcarbenes by *In Situ* X-Ray Crystallographic Analysis”, *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 2383-2391 (2007). (三重項カルベンのX線結晶構造を決定し、室温での安定性との関連を解析した) 被引用数: 9

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報。

(1) 研究成果の社会への還元状況

本研究の成果は、具体的な形で実社会へ還元される段階には達していない。それは目的(2)の安定三重項カルベンを複合化した磁性分子素材が、まだそのようなレベルに達していないからである。三重項カルベンより多重度は低い安定であるラジカルを分子素材として用いた材

料として、スピンを π 共役系でならべた高分子磁石が成果を上げつつあることは注目に値する。これらの研究もまだ開発段階であるが、それらが実現された暁には、当然より高いスピン多重度を持つ三重項カルベンを活用することになるであろうと期待される。特に安定な三重項カルベンを思い通りに多数並べる合成的な手法は、本研究で開発済みであるので、速やかに展開できると思われる。

一方、ラジカルの分野では、最近磁性分野以外の材料素材として、いくつかの新しい展開が注目を集めている。一つはラジカルポリマー電池である。これはラジカルのレドックスによる迅速な電子授受能を利用した電池であり、高出力電池として高い能力を持つことが注目され、小型化、環境問題、安全性、電力のセキュリティー対策などの点で従来型電池より優れていることが示されている。

また、電子輸送能に着目した有機メモリー素子や有機 EL などの開発が積極的に行われている点も注目したい。特に注目したいのは、三重項カルベンと類似の電子構造を持つ三重項ピラジカルが、有機 EL 素子として高い可能性があることが明らかにされたことである。一般の有機 EL の発光は一重項 \rightarrow 一重項遷移によるものなので、その効率は最大 25%に留まるが、三重項ピラジカルを用いた場合、最大 75%と飛躍的に増加する。

もちろん、安定な三重項カルベンを有機電池や有機 EL へ応用するには、まだ多くの課題があることは事実である。しかし、潜在能力はラジカルより大であることは変わらない。例えば、三重項カルベンは原理的には 2 電子の授受が可能であり、電池素材としてはラジカルより優れている。また三重項カルベンは前駆体の光照射によって発生することが可能であるので、感光性を付与した材料としての可能性も期待される。いずれにしても研究を開始した段階では三重項カルベンは磁性材料への展開のみであったが、材料分野は思いがけない展開をみせるものであり、潜在性の高い三重項カルベンへの積極的な応用をはかりたい。

潜在性は高いとは言え、三重項カルベン自体の実質的な意味での社会的な還元は、まだほど遠い段階にある。しかし、学術成果の一般社会への普及という点でみると、我々の試みが Nature へ発表されたことによって、内外の科学関係のジャーナルのみならず、新聞などにも報道され、三重項カルベンという名称のみならず構造、性質からその潜在性までが一般紙で紹介されたことは特筆すべきであろう。一般市民が聞くことがなかったカルベンという化学種が初めて紹介され、基礎学術分野の研究の重要性を認識できる機会を提供したのではないかと思っている。

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況

本研究には大学院学生を含む多くの若手研究者が関与した。研究代表者が研究終了と同時に定年を迎えたこと、そして、担当した研究室の継続性が絶たれてしまったので、これらの研究者の殆どはさまざまな分野へ転身し、それぞれの分野で活躍している。

研究分担者の**平井克幸博士**（研究期間中は三重大学・生命科学研究支援センター・助教授）は引き続き同じポジションで研究を行っている。現在本課題を継続的に発展させている唯一の研究者である。

研究分担者の**高橋 康文博士**（研究期間中は三重大学・工学部・助教授）は、平成 17 年に富山大学大学院医学薬学研究部教授に昇任した。

初期の研究分担者であった**小関史朗博士**（研究期間中は三重大学・工学部・助教授）は、研究期間中の平成 13 年に大阪府立大学総合科学部教授に昇任した。

Athanassios Nicolaidis 博士（研究期間中は博士研究員、後に海外共同研究者）は現在キプロス大学化学科（University of Cyprus）の Associate Professor として活躍している。

伊藤哲二博士（研究期間中は博士研究員）は現在シャープ株式会社研究開発本部先端材料・エネルギー技術研究所第一研究室（東大駐在）の主事として活躍している。

胡応模（Hu Yingmo）博士（研究期間中は博士課程学生）は現在中国地質大学（北京）材料科学与工程学院（School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing）で教授として活躍している。

この他に本研究の遂行には多数の修士課程の学生が含まれるが、殆どが民間企業に就職しており、研究者、技術者などとして、さまざまな分野で活躍している。