

平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成26年 4月 21日現在

研究代表者 氏名	徳宿 克夫	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構・素粒子原子核研究 所・教授
研究課題名	高エネルギー縦偏極電子・陽子衝突による標準模型の精密検証		
課題番号	16001002		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 徳宿 克夫 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器 研究機構・素粒子原子核研究所・教授) 研究分担者 長野 邦浩 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器 研究機構・素粒子原子核研究所・助教)		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成16年度	49,600 千円
平成17年度	55,700 千円
平成18年度	53,300 千円
平成19年度	44,400 千円
平成20年度	26,500 千円
総計	229,500 千円

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

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

本研究は、縦偏極した電子と陽子を、世界最高エネルギーで衝突させる実験を遂行し、電弱相互作用および強い相互作用の精密測定を行い、広範囲で成功を収めている素粒子の「標準模型」の検証とともにそれを越える現象の探索を行うものであった。このために、ドイツ・ハンブルグ市にあるドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) に建設された、世界で唯一の電子・陽子衝突型加速器である HERA において、我々のグループを含んだ国際共同により建設した ZEUS 測定器で実験を進めた。

電子を偏極させることにより相互作用の型を特定して実験でき、標準模型をより精密に検証するとともに、新しい現象への感度を高めた。標準模型の弱相互作用は左巻き粒子間にものみ作用するのが、電子を偏極して入射することにより直接検証できるようになる。電子を複雑な構造を持つ陽子に衝突させることは、陽子の内部をより細かく見る微細電子顕微鏡実験であるともいえる。

計画期間中の平成 19 年に、HERA 加速器の運転が終わり実験も無事完了した。電子、陽子そしてその間の力を媒介する粒子の構造を 10^{-18}m の精度で測定を進めた。我々の研究の結果では、標準理論から逸脱する新現象は観測されなかったが、クォークやグルーオン (総称しパートン) を伴う反応の精密測定は予定通り進み、陽子内部のパートン分布の理解を格段に進歩させることができた。

この研究の後半には、できるだけ精度を上げた結果を得るために、同じ HERA 加速器を使って競争して成果を出してきたもう一つの国際共同実験グループ H1 と共同で、2 つの実験グループの結果を総合するプロジェクトが始まり、いままも継続している。例えば、陽子構造関数の測定、つまり、陽子内部のパートンの分布の精密測定の結果を図 1 に示す。統合により系統誤差を減らせ、個々の実験 (赤、青の点) の平均より精度を上げることに成功した (黒点)。この結果は本研究に関連した論文の中でもっとも引用されている。(論文の発表は 2010 年になったので、項目 2-(2) では研究期間終了後に発表した論文としてリストしておく。)

パートン分布の情報の精密化により、陽子・陽子衝突反応での様々な反応過程の予想の精度を上げることができた。例えば、2012 年に欧州 CERN 研究所の LHC 加速器での実験で発表されたヒッグス粒子の発見にも、間接的に大きな情報を与えた。

収集したデータの解析は、本研究期間を過ぎても継続し、研究代表者も引き続き日本グループの代表として、また、様々な物理論文の査読主査 (Wise person) として、ZEUS 実験グループに貢献し、物理の成果を上げている。特に、ジェット生成断面積の測定や、ジェットの性質の論文、光子とジェットの随伴生成の研究などに関する論文作成に貢献し、このような研究対象は下に述べる ATLAS 実験での貢献と関連してくる。

研究期間終了後は、LHC 加速器の一つの実験である ATLAS 実験での研究に主力を移している。ATLAS 日本の 2 人の共同代表者の 1 人となり、ALTAS 実験の各種委員も努め、実験の運営に貢献している。これには、本研究で既に大規模な国際実験を主導し経験が大きく役に立っている。また、ATLAS 実験での研究においては、前述のヒッグス粒子の探索や超対称性粒子探索などの重点研究に加えて、電子・陽子衝突と陽子・陽子衝突でのジェット生成やジェットの内部構造の比較などの研究を進めている。

以上に加えて、さらに将来の電子陽子衝突加速器のアイデアの議論も進めた。例えば、LHC 加速器にさらに電子加速器を追加して行う LHeC 計画の提案書策定に関与してきた。

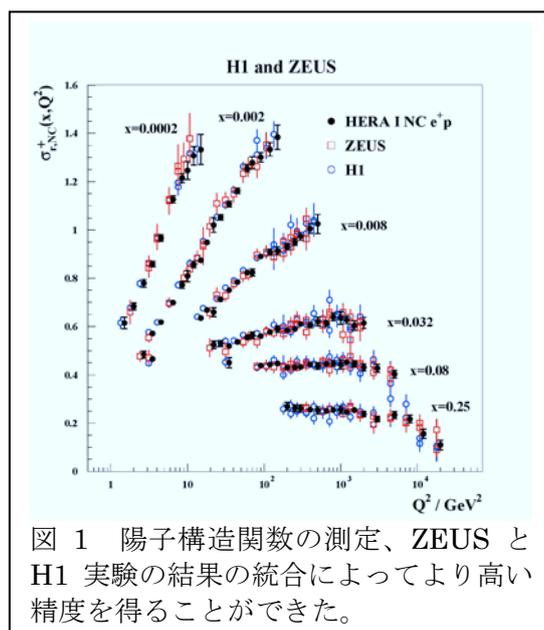


図 1 陽子構造関数の測定、ZEUS と H1 実験の結果の統合によってより高い精度を得ることができた。

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（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

研究期間終了後の平成 21 年 4 月以降に投稿した ZEUS 実験論文は 39 編あり、その内、H1 実験との統合論文は 5 編である。その内の重要なものは、後の論文リストで上げてある。2 実験の情報を組み合わせることによってより感度の高い新粒子探索と、精度のよい断面積測定を達成した。また、本研究で使っていたジェット構成のアルゴリズムと、LHC の実験で使われようとしていた新たなジェット構成アルゴリズムの比較を、電子・陽子衝突データを基に比較するなど、次の研究計画に関連する研究分野への貢献を行った。

平成 21 年以降は研究の主軸は LHC における ATLAS 実験に移った。こちらは本格的実験の始まりが平成 22 年度からで、そちらの実験論文は現在までで 300 編近い論文を発表している。主なものとして、ヒッグス粒子と思われる粒子の発見論文と、その性質の精査から、この新粒子をヒッグスとして確定した論文であるが、そのほかにも超対称性粒子などの新粒子・新現象を、より高いエネルギー領域で探索したこと（兆候なしという結果）、ジェットや、光子生成、陽子陽子衝突での複数のクォークやパートンの同時散乱現象などの観測をおこない、標準理論の精査を LHC の舞台でも行っている。

研究終了後に、研究代表者が、国際会議の招待講演等で、本研究で進めた電子・陽子衝突の成果のみを話すことはなかった。これは、平成 20 年度より、LHC におけるアトラス実験の日本グループの代表者 2 名の内の 1 人に選出されたこともあり、そちらの活動を中心に進めたことにもよる。2009 年以降の会議でのトーク、一般講演等は、LHC 関連の話題に絞った。ただし、その中には、本研究の HERA での実験の話題も加えたものも多く、当研究の電子・陽子衝突実験で得られた成果もちりばめて話している。主な講演のリストを下に示す。

2011 年

“QCD at energy frontier: from HERA to the LHeC.” Invited talk
at RIKEN Workshop. 9 月理研

“LHC now and its future prospect.”

Invited talk at KMI Inauguration Conference on “Quest for the Origin of
Particles and the Universe” (KMIIN) 10 月名古屋大学

2012 年

「科学と音楽の饗宴」 「質量の起源とヒッグス粒子 「実験の成果」
： どうやってヒッグス粒子を見つけるか？」

一般講演： 10 月 つくば市、

2013 年

“HERA/ZEUS” Phenix workshop: 8 月理研

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（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

科学研究費助成事業

新学術領域研究（研究領域提案型）

「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦」
の計画研究 A01

「ヒッグス粒子の発見による素粒子の質量起源の解明」 研究期間：平成 23-27 年度
研究期間の配分総額（予定）： 192,600 千円

ほかの事業：

制度担当府省等： 文部科学省（日本学術振興会）

「頭脳循環を活性化する若手研究者海外派遣プログラム」

「次世代のフロンティア加速器実験へ向けての欧州合同原子核研究機関（CERN）

との共同研究」

平成 22-24 年度 研究期間の配分総額：72,460 千円

制度担当府省等： 文部科学省（日本学術振興会）

「頭脳循環を加速する若手研究者戦略的海外派遣プログラム」

「エネルギーフロンティア加速器と新世代測定器に関する CERN-KEK 開発共同研究」

平成 25-27 年度 研究期間の配分総額：70,360 千円

(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

本研究の研究成果で新しく得られた知見の中でも重要なものは、

1. HERA における電子・陽子衝突実験で探索できる数百 GeV のエネルギースケール（あるいは、 10^{-18} cm 程度の長さのスケール）において、素粒子の標準理論は現象をよく記述していることがわかったこと。
2. 陽子内部のクォークやグルーオンの分布を精密に決めることができ、低い運動量を持つグルーオンやクォーク急激に増えていることがわかった。その変化は標準理論の一翼を担う量子色力学（QCD）でよく記述できている。

の 2 点である。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

前項（4）で述べた主な結果は、素粒子物理実験研究において、より高いエネルギースケールでの標準理論の精査と、陽子内部のクォークやグルーオンの分布をさらに多変数で決めてゆく研究への発展を促した。

前者に関しては、当時建設中であった、世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器である、ジュネーブ CERN の LHC 加速器での実験へと引き継がれることになり、本研究代表者も国際共同実験の一つである ATLAS 実験に参加して研究を進めた。2012 年のヒッグス粒子の発見により、標準理論の根幹である自発的対称性の破れによって素粒子が質量を獲得するという理論の枠組みの正しさが検証され、2013 年のノーベル物理学賞はこの提唱者の P. Higgs 氏と F. Englert 氏に与えられた。LHC では標準理論を超える新粒子の探索も非常に速いテンポで進められている。HERA での本研究と同じように、残念ながら今のところ新しい物理現象の兆候は観測されていないが、より高いエネルギーでの探索が LHC においても今後 10 年以上にわたって続けられる。本研究代表者も ATLAS 実験においてこれを進めて行く。

後者に関しては、本研究で得られたクォークやグルーオン（総称してパートン）の分布は、運動量の大きさ分布という一変数に関するものである。この量を精度よく決めることは大変重要で、既述のように、LHC における Higgs 粒子の発見への影響など、陽子・陽子衝突で現象を定量的に議論するためには、わからなくてはならない量である。本研究による測定があって初めて、陽子・陽子衝突での標準理論の精密検証（及びそこから逸脱する新現象の探査）ができるようになったともいえる。しかし一方で、陽子の構造をさらに詳しく調べる研究の方向の検討も進められてきた。

一つには、HERA では観測できなかった、さらに小さな運動量を持つパートンの振る舞いの研究である。摂動的な QCD による記述があるところで破綻すると考えられており、そこでの多重パートンの効果を調べることである。

もう一つは、パートンの運動は「大きさ」という一つの変数だけでなく、3次元物体としての陽子を成り立たせるには3次元の情報があり、それは陽子の反応のダイナミズムに反映されるはずである。偏極した電子と偏極した核子の衝突での光子生成などで、パートンの分布をその大きさと中心からの距離（インパクトパラメータ）の多次元情報で研究できることが指摘されており、その実験による測定議論が進んでいる。

これらの研究のためには、より高いエネルギーの電子・核子衝突加速器、あるいは電子・原子核加速器の建設が必要である。LHC での陽子・陽子衝突から情報を得るのも一つの研究手法であり、それは現在精力的に進めている。さらに、新しい加速器を作る計画として、欧州では LHC のトンネルに電子加速器を加える LHeC 計画、米国では電子・原子核衝突を主眼にした、eRHIC や ELIC 計画が検討されている。本研究代表者は LHeC 計画の International Steering group の一員として、Conceptual Design Report (CDR) をまとめる上での貢献を行った。LHeC 計画に関しては、LHC の実験と並行して行うのは、時間的・財政的にも現実的ではないというのが最近の情勢であるが、CDR での検討事項は米国の eRHIC 等の提案にも反映されており、また、さらに将来の周長 80-100km ぐらいの円形加速器 FCC での ep 衝突の検討などへと受け継がれている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	An NLO QCD analysis of inclusive cross-section and jet-production data from the zeus experiment ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Eur.Phys.J. C42 (2005) 1-16	次項論文1の前に発表した、ZEUS実験のデータのみを使った、陽子内部のクォーク・グルーオン分布を決定した論文。陽子の構造関数測定とジェット生成断面積を同時に使ってQCD解析を行った。	180
2	Study of deep inelastic inclusive and diffractive scattering with the ZEUS forward plug calorimeter ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Nucl.Phys. B713 (2005) 3-80	陽子の構造研究のなかで、特に回折反応に絞って研究した論文。回折反応を媒介する仮想粒子ポメロンが、クォークと比べて圧倒的にグルーオンを含んでいることを示した論文	117
3	Exclusive rho0 production in deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in PMC Phys. A1 (2007) 6	回折反応の中でも特別なケースとして、 $ep \rightarrow ep\rho$ という反応に限った論文。陽子内部のグルーオンの分布とダイナミクスをそこから考察している。	91
4	A Measurement of the Q^2 , W and t dependences of deeply virtual Compton scattering at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in JHEP 0905 (2009) 108	仮想光子と陽子が散乱して、光子と陽子を生成する反応断面積を測定したもの。この過程は陽子の2次元的な構造を理解する上で重要であり、その多変数測定（特に t 依存性）を初めて測定でた。高精度の測定が将来計画での重要課題となり、そのベンチマーク的論文となった。	70
5	Inclusive-jet and dijet cross-sections in deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Nucl.Phys. B765 (2007) 1-30	電子陽子非弾性散乱でのジェット生成断面積を測定した論文。そこから、強い相互作用の結合定数 α_s をよい精度で求めることができた。	50
6	Measurement of the Longitudinal Proton Structure Function at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Phys.Lett. B682 (2009) 8-22	縦偏極した電子・陽子衝突により、陽子の縦方向構造関数を初めて測定した論文。縦方向構造関数は陽子内部のグルーオン分布の関係が深く、論文1で求めたグルーオン分布と誤差の範囲で一致することがわかり、QCDの新たな検証となった。	48
7	Measurement of high- Q^2 neutral current deep inelastic e^-p scattering cross sections with a longitudinally polarised electron beam at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Eur.Phys.J. C62 (2009) 625-658	高い運動量領域での、縦偏極下電子による、中性流深非弾性散乱断面積の測定。 Z 粒子と光子の干渉効果をきれいに示した論文	43
8	Jet-radius dependence of inclusive-jet cross-sections in deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov (Argonne)). Published in Phys.Lett. B649 (2007) 12-24	ジェット解析を行う上で、そのジェットの横方向の広がり小さく押さえたアルゴリズムを使うことでQCDの予測とのずれが出てくるかどうかを調査した論文。変更した範囲ではいずれの場合でもQCDの予言とよくあることがわかった。狭いジェットを扱う必要があるLHCの解析への重要情報を与えた。	42
9	Measurement of charged current deep inelastic scattering cross sections with a longitudinally polarised electron beam at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Eur.Phys.J. C61 (2009) 223-235	高い運動量領域での、縦偏極電子による、荷電流深非弾性散乱断面積の測定。 W 粒子の特性が調べられ、標準理論の通り、右巻き W 粒子がこのエネルギー領域までには存在しないことを確認した。	33
10	Measurement of high- Q^2 deep inelastic scattering cross sections with a longitudinally polarised positron beam at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Phys.Lett. B637 (2006) 210-222	高い運動量領域での、縦偏極陽電子による、荷電流深非弾性散乱断面積の測定。 W 粒子の特性が調べられ、標準理論の通り、右巻き W 粒子がこのエネルギー領域までには存在しないことを確認した。論文9と対になる論文。	27

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Combined Measurement and QCD Analysis of the Inclusive $e^{\pm} p$ Scattering Cross Sections at HERA H1 and ZEUS Collaboration (F.D. Aaron et al.). Published in JHEP 01 (2010) 109	項目1で取り上げた、ZEUSとH1の実験を統合した陽子構造関数の測定の論文。そこから陽子内部のクォーク・グルーオン分布を精密に求めることができた。	431
2	Combination and QCD Analysis of Charm Production Cross Section Measurements in Deep-Inelastic ep Scattering at HERA H1 and ZEUS Collaborations (H. Abramowicz et al.). Published in Eur.Phys.J. C73 (2013) 2311	電子・陽子衝突深非弾性で、チャームクォークが生成する事象の断面積をH1, ZEUSの両実験データを統合して解析した論文。 チャーム生成は陽子内部のグルーオンの振る舞いと関係が深く、論文1で求めたグルーオン分布との比較検討を進めた。	41
3	Inclusive-jet cross sections in NC DIS at HERA and a comparison of the kT, anti-kT and SIScone jet algorithms ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). Published in Phys.Lett. B691 (2010) 127-137	LHCで使われるようになった、新しいジェットアルゴリズムをep衝突で生成したジェットに応用し、古いアルゴリズムとの比較検討を行った論文。新しいアルゴリズムの有効性とQCDの予想との整合性を検証できた。	22
4	Measurement of beauty production in DIS and F_{bb}^{-2} extraction at ZEUS ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). 2010. 32 pp. Published in Eur.Phys.J. C69 (2010) 347-360	電子・陽子衝突深非弾性で、ボトムクォークが生成する事象の断面積を測定した論文。 論文2と同様、ボトム生成も陽子内のグルーオンの振る舞いと関係が深く、グルーオン分布を議論した。	18
5	Events with an Isolated Lepton and Missing Transverse Momentum and Measurement of W Production at HERA H1 and ZEUS Collaboration (F.D. Aaron et al.). Published in JHEP 1003 (2010) 035	高エネルギーのレプトンと欠損運動量を伴う事象から新粒子の探索を行った論文。両実験の結果を合わせることで、感度を増した。得られた事象はW粒子の崩壊に起因することがわかり、新粒子の生成が起こっていないことを結論とした。	17
6	Production of excited charm and charm-strange mesons at HERA ZEUS Collaboration (S. Chekanov et al.). Published in Eur.Phys.J. C60 (2009) 25-45	チャームクォークを含む中間子の生成断面積を測定し、チャーム中間子の生成機構の考察を行った。	17
7	Inclusive-jet photoproduction at HERA and determination of alphas ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). Published in Nucl.Phys. B864 (2012) 1-37	光子・陽子衝突でのジェット生成断面積を測定し、そこから強い相互作用の結合定数を精度よく求めた。	13
8	Search for single-top production in ep collisions at HERA ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). Published in Phys.Lett. B708 (2012) 27-36	トップクォークの生成事象の探索を行った。生成されていないことから、トップクォークと軽いクォークとの間でのフレーバー移行中性流反応の強さへの制限を与えた。	10
9	Search for first-generation leptoquarks at HERA ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). Published in Phys.Rev. D86 (2012) 012005	前ページの論文7, 9, 10等を受けて、断面積が標準理論と一致していることから、レプトクォークなど、理論で予測されている新粒子が軽い質量領域にはないことを示した論文	6
10	Production of Z^0 bosons in elastic and quasi-elastic ep collisions at HERA ZEUS Collaboration (H. Abramowicz et al.). Published in Phys.Lett. B718 (2013) 915-921	ep衝突での初めての Z^0 の実生成観測を示した論文。頻度は標準理論の予想と合っている。研究分担者(途中から連携研究者)が解析の中心となった論文	4

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

この研究の成果は素粒子物理学内での貢献であり、直接社会へ還元するものはない。特に、得られた結果は標準理論と無矛盾であり、新しい相互作用の効果は、我々の観測したエネルギー領域では見からなかったことから、新しいブレークスルーは得られなかった。このようなネガティブな探索結果は、科学的には標準理論のさらに広い適応範囲を確認したとすることで意義があるが、一般社会のインパクトは限られている。

しかし、陽子内部のクォーク・グルーオン分布の精密測定の結果は、既述のように、陽子・陽子衝突でのヒッグス粒子生成断面積と、そのバックグラウンド事象の見積もりの高精度化につながり、CERNのLHC加速器における、ATLASおよびCMS実験のヒッグス粒子発見に間接的に貢献している。この発見は、日本の各新聞・テレビも一面で取り上げられ、国民の基礎科学への興味が高いことを示すものであった。

次項でも述べるように、私や研究分担者、連携研究者に加えて、この研究で博士論文をとった大学院生が、研究者として多く ATLAS 実験に参加して活躍しているという点も広い意味では大きな貢献といえる。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本計画中には東京大学、首都大学東京、及び、東京工業大学の大学院生が参加して、測定器運転・物理解析にあたった。期間中に 7 人が、そして期間後に 1 名が学位論文を取得した。彼らの内 2 名は現在任期付き助教として素粒子実験を推進しており、主に LHC における ATLAS 実験に参加して活躍している。その内の一人は 2013 年 3 月までは、ポスドクとして、フランスにおけるニュートリノ実験 (Double Chooz) の Online-Electronics Coordinator として活躍していた。もう一人は、ATLAS 実験の Jet 物理解析グループの Convener を行っており、本計画で進めていたジェット解析との関連が深い分野で活躍している。一人は米国のポスドクとしてやはり ATLAS 実験を進めている。一人は任期なし助教として加速器開発を行っている。また一人は、技術職員として、素粒子実験に関与している。残りの 3 名は一般企業へと就職した。

期間中に雇用したポスドクは、現在 SPRING-8 で加速器研究を進めている。

研究分担者の長野邦浩助教は、2012 年に高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所の准教授に昇格し、長野氏は、ATLAS 実験に参加し、現在 Trigger Menu Coordinator として、実験の遂行に関して重要な役目を果たしている。