

Physics by Inquiry の検討：
初等理科の教員養成カリキュラムとしての有効性と
限界について

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2016-04-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山田, 吉英, 石井, 恭子 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/9935

Physics by Inquiryの検討 — 初等理科の教員養成カリキュラムとしての有効性と限界について —

福井大学教育地域科学部 山田 吉英
玉川大学教育学部 石井 恭子

本研究は初等理科の教員養成カリキュラムとして、PER (Physics Education Research) カリキュラムの源流であるPhysics by Inquiryの検討を行った。第一に、インストラクショナルデザインのフレームでその教育目標と教授方略を検討し、第二に、電気回路モジュールを用いた実践を電気回路概念調査テストDIRECT (Determining and Interpreting Resistive Electric Circuit Concept Test) を用いて規格化ゲインを求め、第三に、受講生の省察レポートを実践者が解釈した。その結果、学生の概念変化に効果的であり、意図された教授方略が機能している可能性が示された。また、この教授方略を学校現場で再現しようとする際に検討すべき課題と、教員養成カリキュラムとしての発展の方向性を考察した。

キーワード：理科教育、物理教育、PER、Physics by Inquiry、誘導探究

1. はじめに

2012年、RedishによるPER (Physics Education Research) の解説書 *Teaching Physics with the Physics Suite* が日本物理教育学会の監訳で『科学をどう教えるか』として刊行され、国内の物理教育関係者から大きな注目を集めた。PERは教育学者や理科教育者達によるそれまでの教育研究と独立な分野として生まれた研究分野であり、担い手の多くは物理学者である (Cummings, 2011)。関連諸科学である化学 (Chemistry)、生物学 (Biology)、地球科学 (geo-sciences)、天文学 (astronomy)、工学 (engineering) においても同様の教育研究分野があり、これらを総称してDBER (Discipline-based Education Research) という。McDermott (2014) は、DBERと伝統的な教育研究の違いを、重視する論点の違いに求めている。すなわち、PERは教育の理論や方法学ではなく、科学の内容と科学的推論に関する学習と教授の問題に特に関心がある。McDermott & Redish (1999) はPERについて最初の総説論文を発表したが、その際、実証的な研究として満たされるべき条件として、(1) 学生の物理学習に関する現象に研究の焦点を当てていること、(2) 系統的な方法で研究が行われていること、(3) 手続きが詳細に述べられ、再現実験が可能であること、の3つを挙げている。特に、PERの方法を用いて、有効性が実証されたカリキュラムを「研究によって妥当性を確かめられた (research-validated)」カリキュラムとMcDermott (2014) は呼んでいるが、この名称は近年、単にPERの研究結果 (誤概念など) を踏まえて書かれただけで、効果の実証されていない教科書が「研究に基づく (research-based)」教科書として宣伝されることへの警告の意を含んでいた。本研究では、教育効果について妥当性を確かめられているカリキュラムのことを、PER

カリキュラムと呼ぶことにする。教育効果の妥当性評価は、通常、被験者の誤概念を引き出す概念調査テストが用いられている。

2. 先行研究

我が国におけるPERカリキュラムの検討状況を述べる。

笠 (2010) は、授業改革に熱心なベテラン教員に呼びかけ、彼らの高校での授業の事後テストとして、概念調査テストの一つであるFMCE (Force and Motion Conceptual Evaluation) を実施し、米国において開発者らが示したスコアの再現性を確認した。笠は「自分の授業の受講生の大半が授業後にも「運動の向きに力がはたらいっている」と答えているという現実は大変ショックで、このような調査を行うことで、自己の授業に対する再考の程度はまったく異なってくる」と述べている。

様々な概念調査テストの中でも、特にFCI (Force Concept Inventory) は20ヶ国語に翻訳され、世界的に広く用いられている。新田・塚本 (2011) らは注意深くFCIを日本語に翻訳し、安田ら (2011) は設問表現の妥当性評価を行った。2014年にはこの日本語版FCIを用いた大規模な調査が行われた (長谷川ら, 2015)。

また、アドバンシング物理研究会はPERカリキュラムの一つであるRealTime Physics (学生自身による実験を基礎としたカリキュラム) やInteractive Lecture Demonstrations (教師による演示実験を基礎としたカリキュラム) を用いた実践を行い (ただし通常の授業ではなく2日間の公開講座で、少数の受講生を対象としているが)、事前・事後テストにFMCEを用いて正答率の変化を評価し、実践の効果と、課題について情報を引き出す方法を例示している (笠, 2010)。

植松 (2011) は「チュートリアル」と呼ばれる授業を

教員養成系の大学2年生に対して行った。この実践の元になっているのは Maryland 大学の Redish や Elby らによる Open Source Tutorials である。この実践をサポートした Maryland 大学の大学院生（当時）であったハル（2012）は、アメリカ本国では、チュートリアルのような新しい教授方法は学習者の心理的抵抗が大きいのに対し、日本の学生は抵抗が少ないという観察に基づき、インタビュー調査の質的データをもとに、日本の初等教育における構成主義的な学習経験（学習者が考え、答を導き、他の学習者と交流し、他者の考えを判断する機会）が関わっている可能性を示唆している。

Yamada (2014) は、PER 先行研究と PER カリキュラムをもとに初等光学（主に幾何光学）に関するカリキュラムを開発し、実践を行った。概念調査テストとして LOCE (Light and Optics Conceptual Evaluation) を用いて、一定の効果を確認した。

以上、我が国での PER カリキュラムの検討状況を述べたが、これらの源流と見られるのが McDermott ら (1996) による PbI (Physics by Inquiry) である。我が国においては、石井ら (1999) がいち早く PbI の教材研究を行い、小中学校での理科授業実践に取り入れ、小中高を通して使えることを目指したワークシート教材を作成している。また、石井・山田 (2015) においては、より抽象的な理念のレベルで PbI のカリキュラム構造を分析し、我が国における教育改革への示唆を引き出している。本研究は、これらの研究を補完する基礎研究として、特に初等理科の教員養成カリキュラムとしての有効性と限界を吟味するものである。

3. 方法

本研究は、3つの異なる観点から PbI のカリキュラムを検討する。第一に、PER と異なる教育研究分野であるインストラクショナルデザイン（ガニェら、2007）の概念フレームを用いて PbI の教育目標と教授方略を同定する。第二に、PbI の電気回路モジュールを日本語に翻訳して実践を行い、概念調査テストにおける事前、事後のスコアの伸びを測定する。第三に、受講生の振り返りレポートを実践者が解釈することによって、そのカリキュラムがどのような学びを引き起こすと実践者が考えているか、データを示す。

3.1. 開発の経緯と理念、目標・理念・方略

PbI の分析に先立ち、ここでは主として McDermott (2014) を引用しつつ、PbI の開発経緯と理念、教授方略を示す。この文献は AAPT (American Association of Physics Teachers) での Melba Newell Phillips Medal の受賞記念論文であるが、物理教育の研究における自身の立場や、物理教育研究者としての個人的なキャリアの形成、PbI の各モジュールの開発経緯などが語られており、PER カリキュラム開発の事例として有用な資料となっ

ている。

3.1.1. 開発の経緯と理念

PbI は、1960年代～70年代のスポーツニク時代の「新カリキュラム」すなわち ESS (Elementary Science Study), SCIS (Science Curriculum Improvement Study), S-APA (Science-A Process Approach), IPS (Introductory Physical Science), Harvard Project Physics, PSSC (Physical Science Study Committee) など、探究的な初等中等理科カリキュラムを教える教員の研修と養成の必要性の中から生まれてきた (McDermott, 2006a)。1970年頃、Washington大学のAronsが「新カリキュラム」を教える教員研修プログラムを実施するとして NSF (National Science Foundation) に申請したのがこのはじまりである。そのプログラムは後に *The Various Language* として出版されている (Arons, 1977)。McDermott は、Arons の実践を手伝う中で、格調高く簡潔な文体で書かれたテキストに困難を感じる学生のため、より易しい文体で、またスモールステップの小問群よりなるワークシートを開発した。これが後に PbI へと発展する。

特に本研究で検討する電気回路のモジュールは、1985年に McDermott の研究室の大学院生となった Shaffer が、Washington大学の学生（ただし基礎学力不足の特別プログラム学生、教員志望の学生、現職の初等中等教員、物理学科の学部生や大学院生など、様々な学生）に対して、かつてピアジェが行ったような、演示実験を伴うインタビュー調査と、その結果を用いた質問紙調査を行い、その結果をもとにワークシートの充実と改良を行った。この調査研究の成果は McDermott & Shaffer (1992) と Shaffer & McDermott (1992) にまとめられている。PbI で扱う問題の性質、種類についての感覚を掴んでいただくため、そこで用いられた調査問題の例を以下に示そう。

電球A～Eの明るさをランク付けせよ。ただし電源は理想的と仮定する。

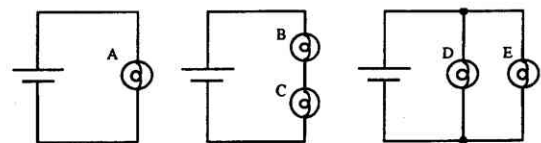


図1：豆電球の明るさランキング課題

このような単純な問題であっても、多くの学生が誤答する（正解は $A=D=E>B=C$ ）。また、以下の様な問題も、多くの学生にとっては先の問題と同一ではない。

電球A～Eの明るさをランク付けせよ。ただし電源は理想的と仮定する。

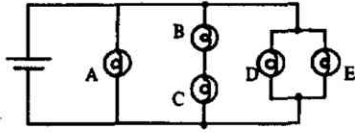


図2：並列分岐における豆電球の明るさランキング課題

実際、この問題を適切に考えるためには、電流、抵抗、電圧の概念はもとより、電源をまたぐ分岐の独立性、回路図における線が導線ではなく接続関係を表すこと（そのような抽象化が可能であること）、電源は定電圧源であって定電流源ではないことなど、多くの知識が要求される。

The Various Language と PbI のテキストを比較すると、電気回路に割かれているページ数が、前者では 14 ページであるのに対し、後者では 135 ページあり、およそ 10 倍に膨れ上がっている。これは扱う範囲が広がったこともあるのだが、それ以上に、テキストの果たす役割が大きくなったことを示している。この事情を説明しよう。Arons のプログラムは「ほとんどの人は自分が教えられたように教えようとするので、探究法を語って聴かせるのではなく、実際に彼ら自身、その教材で直接体験してもらうことによって教える」というコンセプトであり、そこでは、「コースの初めの頃には、教師が作った概要や学習ガイドがかなりの分量、与えられるが、徐々にこのような教師の支援は少なくなっていく、ついには文書による誘導は全く無くなる」という性格のものであった (McDermott, 1974)。一方、PbI においては、学生は徹頭徹尾、テキストの誘導に従って学習を進める。小グループで、注意深く配列された一連の説明文、実験課題、練習問題を、自分たちで読み、行い、解き進めていく。McDermott はこれを誘導探究 (guided inquiry) と呼び、オープンエンドの探究との違いを、「学生が学んでほしい物理が、その学生の教育水準において適切だと物理学者が考えるだろうスタンダードを満たす」点に認めている。

McDermott (1991) は、「カリキュラム開発における大きな課題は、学習者の関心と関与を、必要な水準まで引き出すために、どの程度の誘導が適正量なのかを見極めること」だと述べている。誘導が多すぎても少なすぎても、教材に対する学生の有意味で知的な取り組みの可能性が損なわれると考えられている。また、「我々はカリキュラムを全体的なものとする。すなわち内容（シラバス、テキスト、問題、実験室での実験）とその教え方の一体化である。我々はバランスを探している。内容とプロセスのバランス、また、知識としての科学と考え方としての科学のバランスである。」このような課題に対する McDermott などの解答が、誘導探究型の PbI であった。

ただし、この解答は最終的なものとはみなされているわけではない。先の引用に続けて、「我々は三つのプロ

セスを通して、学生によく適合したカリキュラムを生み出そうとする。それは、(1) 授業前、授業中、授業後に学生が物理をどう考えるかの系統的調査を行う、(2) その研究結果を手がかりにカリキュラム開発を行う、(3) 教室という環境のもと、学生からの詳細なフィードバックを絶えず入手し、教材を設計、試用、修正、改訂を行う。我々は研究・カリキュラム開発・教育の 3 つを、絶えることのない、相互作用的で反復的なプロセスの要素とみなす」と、開発理念を述べている。事実、PbI は 1996 年に公刊された後も、Washington 大学で使われる私家版においては、実践をもとに修正と改訂が続けられている。この点について、特に McDermott (2006a) に重要な指摘が見られるので引用しておこう。「カリキュラム開発プロジェクトの歴史が示していることは、教材を広く配布しようとしても、開発者がその実施に積極的に関わり続けていなければ、その活力を維持するのは難しいということである。開発者は新規ユーザーを援助し、彼らからのフィードバックに責任をもって応じ、新版で適切な変更を行わなければならない。このような役割を無視したり、あるいは出版社に委託したりしてしまえば、それがどんなに良い教材であっても、幻滅と衰退につながる。スプートニク時代の改革運動がそうだったように。」

テキストが学習者を誘導していく PbI において、教師は何をするのだろうか。テキストには、数問ごとにスタッフ（教師とティーチングアシスタント）による点検欄 (checkout) が設けられており、学習者は学習状況を報告し、スタッフとの議論を行う。スタッフは学習者の理解状況を把握するため、学生の報告を注意深く聴き、確認のための質問や、理解を試す追加の質問を行う。たとえ学生が誤解していた場合でも、語って聴かせることで説得するのではなく、あくまで学生達自身で考えさせるための質問を行う。McDermott はこれを *teaching by asking* と呼んでおり、これは Arons 以来「ソクラテスの問答法」として知られ、様々な PER カリキュラムで用いられている指導法である。

PbI をはじめ、全ての PER カリキュラムは「耐教師性 (teacher proof)」ではなく、適切な取り扱いができるようになるためのトレーニングを実践者に要求する。PbI の場合、実際に PbI の授業を受けることと、PbI の実践にティーチングアシスタントとして加わる経験を持つことが推奨されている。アメリカで年 2 回開かれる AAPT (American Association of Physics Teachers) の大会では、平日の研究発表に先がけ、土日に多数のワークショップが開催されるが、そこでは様々な PER カリキュラムの開発者達が、自分達のカリキュラムを用いた研修会を用意している。新しいカリキュラムを実践しようとする教師は、このような研修への参加が期待されているのである。

ところで、PbI の「学習者の概念調査に基づき、注意深く配列された設問群」という特徴は、我が国の特色あ

る理科教育カリキュラムとしてよく知られた仮説実験授業を連想させるものである（たとえば塚本，2004）。筆者らの見る所、両者の相違点として、仮説実験授業は教師が教室の学習進度を調整する「学級一斉授業」であるのに対して、PbI は「グループ別」に各々の進度で学習は進み、基本的にグループ間の相互作用が無い点、仮説実験授業では「教師がやってみせる演示実験」であるのに対し、PbI では「学生自身による個別実験」である点、仮説実験授業は実験結果に関する議論を行わないが、PbI では議論が要求される点、そして仮説実験授業では教師に特別なトレーニングを求めないが、PbI では教師に十分な研修を受けることが望まれる点が大きく異なる（表 1）。

表 1：仮説実験授業とPbIの相違点

	仮説実験授業	PbI
授業の進行	学級一斉	グループ別
実験	教師の演示	学生が行う
実験後の議論	なし	あり
教授技能の研修	なし	あり

3. 1. 2. 目標・理念・方略

McDermott は、物理教育の目標を、教材に対する機能的な理解（functional understanding）であるとしている。これは「知識を、それが最初に獲得されたのとは異なる状況において、解釈し使う能力（教育の水準が上がるとともに、異なる度合いも増加する）」としている（McDermott, 2001）。初等中等理科教育においても、ただちに子どもたちに機能的な理解を保証するわけではないにせよ、機能的な理解に向けての発達を教師は支援する必要がある。それを実現するためには、教師自身、教材の健全な把握に加え、子どもたちが直面する可能性の高い、学習上の概念や推論に関する困難をあらかじめ理解し、取り組めるようになっておく必要がある。それゆえ、PbI が学習者に要求する教材理解の程度は、この機能的な理解の水準となっている。

機能的な理解をいかに学生に保証するか。長年に渡る研究・教育経験から、PbI の有効性のもととなる 4 つの教育理念が抽出されている。

- ・概念、推論能力、表現技能は、教科内容の一貫した体系の中で、一体となって発達されるべきである。
- ・物理学は、不活性な情報の集積としてではなく、探究のプロセスとして教えられるべきである。
- ・物理学の形式と現実世界の現象を結びつける能力は、明示的に発達させられる必要がある。
- ・多くの学生が物理学において直面する特定の困難は明示的に取り組まれる必要がある。

これを具現化した PbI の教授方略を、McDermott は引

き出し（elicit）―直面させ（confront）―解決させる（resolve）モデルと呼んでいる。すなわち、概念調査研究によってあらかじめ知られた、学生の困難を引き出すような実験課題を用いて、学生の誤概念を可視化する。次に、この誤概念が、論理的一貫性を保てないことを、問いや他の実験を用いて、学生に突き付け、認知的葛藤状況に追い込む。そして、学生同士のグループや教師との忍耐強い議論を通じて、辻褄の合う解釈へと導いてゆく。

通常、このようなプロセスが 1 サイクルで済むことは珍しいので、追加の学習プロセスとして、応用し（apply）―振り返り（reflect）―一般化する（generalize）プロセスが付け加えられる。

3. 2. 実践の概要と概念調査テスト

3. 2. 1 実践の概要

2014 年度と、2015 年度に、それぞれ異なる受講生に対して実践を行った。対象はともに大学に入学したばかりの 1 年生であり、小学校の教員、または理科ないし数学の中学校・高校教員を志望している学生達である。本実践は選択科目の「基礎物理学演習」の授業として行った。受講生達は「教育実践研究」などの授業を通じて、グループワークの経験を比較的多く持っているのが他大学の学生と比較して特徴的と思われる。ただし、それらの授業の中でグループワークの技法について担当教員から明示的に教わることはなく、自分達自身でグループワークを機能させる方法をつくり出すことが期待されているため、実質的なグループワークの体験内容は学生によってまちまちである。

また、本実践以外でも学生達は電気回路を学ぶ機会があったことを公正のために述べておく。第一に、必修科目の「基礎物理学」の授業であり、そこでは担当教員による演示実験と標準的な問題演習が行われている。ただし 15 回の授業で高校物理のほぼすべての範囲をカバーするため、電気回路にかけた時間はあまり多くないはずである。仮に 1 回 90 分の講義を電気回路に充てたとすると、授業時間外の自習をあわせて 270 分の学習が見込まれる。第二に、やはり必修の「理科実験観察法」で、こちらの授業は本実践の実践者が担当している。こちらの授業では PbI のセクション 1 の最初の数問に相当する、「完全な回路」の概念に関するグループでの協同探究にファシリテーターとして参加している（180 分）。また、もう 180 分、「理科実験観察法」の中で電気回路を学んでいるが、2014 年度と 2015 年度とで内容が異なる。2014 年度には、PbI のセクション 2 の電流に関する内容をグループワークで学んでおり、2015 年度には Interactive Lecture Demonstrations（Sokoloff & Thornton, 2004）の電気回路ユニットで電圧や電力まで一通り学んでいる（ただし、原著では豆電球の直列・並列である所を、小学校の学習内容である電池の直列・並列に置き換えたことと、原著では教師によるセンサーを用いた演示

実験である所を、通常のアナログ電流計・電圧計を用いた学生達のグループ実験に置き換えた点が異なっている)。要するに、PbI以外のところにも学生の概念変化に寄与する要因が存在し、しかも、それらの要因は2014年度と2015年度とで同一ではない、ということである。実証的な教育研究といっても、このような条件制御の不十分さが残ってしまう点は留意が必要である。

2014年度には大学院生が2名、2015年度には大学院生が1名、ティーチングアシスタントとして参加した。2014年度の大学院生達はPbIの受講経験が無かったため、授業時間外に研修の時間を設けたが、2015年度の大学院生はPbIの受講経験があったため、特別な研修は行わなかった(むしろここでのティーチングアシスタント経験自体が研修的な意味合いを持つ)。

週1回、90分の授業15回では、電気回路モジュールの全てを扱うことはできず、以下に示す目次のうち、2014年度はPart Bまで、2015年度はPart Aまでを扱った。

Part A:	簡単な電気回路の振る舞い
§ 1	電球が1個の回路
§ 2	電流のモデル
§ 3	電流モデルの拡張
§ 4	直列と並列のネットワーク
Part B:	電流と抵抗の測定
§ 5	キルヒホッフの第一則
§ 6	等価抵抗
Part C:	電圧の測定
§ 7	電池が複数ある場合
§ 8	キルヒホッフの第二則
§ 9	直列と並列への分解
§ 10	オームの法則
Part D:	日常生活における電池と電球
§ 11	現実の電池
§ 12	エネルギーと電力

成績評価については、各セクションが終わる毎に課される宿題用の問題(これもPbIのテキストに掲載されている)と、期末試験、期末の振り返りレポートを採点対象とした。

受講者数と修了者数は以下の通りである(表2)。

表2：受講者数と修了者数

	受講者数	修了者数
2014年度	20人	13人
2015年度	19人	16人

また、1年目の実践で得られた実施上の問題点(単位を取得できなかった者が20人中7人いること)について、2年目では対処を行った。受講生を学習に対して動機づけるため、ARCS動機づけ方略(ケラー, 2010)を意識

した働きかけを行った。具体的には、3.3節に述べる毎週の振り返りレポート提出と教員からのコメントのフィードバックを行った。これは(当時実践者が意識していたわけではないのだが結果的に)形成的評価を強化する役割を果たした。

なお、筆者らが2014年3月、実践に先立ち、Washington大学McDermottらの研究室を訪れ、Shaffer教授に実践上の助言を求めた際、指摘されたのが週1回90分という授業時間の少なさであった。Washington大学では110分の授業を週2日(水曜日と金曜日に)行っている。週1回の授業では、内容に十分集中できず、以前の学習内容を忘れられてしまうことが危惧された。その時点で示されたアイディアは宿題問題の提出期限を調整すること(月曜日に授業を行い、宿題を木曜日に持ってこさせるというもの)であった。結局、教室一斉授業を行うわけではないため、学生が宿題の問題に取り組めるタイミングが同期されず、このアイディアは実行することができなかったが、2年目の実践の際には、振り返りレポートが復習の機会を与えた。

3.2.2 概念調査テスト

PbIの有効性を評価するための概念調査テストとして、電気回路に関するDIRECT (Determining and Interpreting Resistive Electric Circuit Concepts Test) のVersion 1.2を翻訳して用いた(Engelhardt & Beichner, 2004)。これは古典テスト理論に基づき、一定の信頼性や妥当性が確保されるように開発されたテストである。個々の設問の妥当性に関して若干の疑問は見られるものの、総じて、電気回路に関する概念理解を問うのに慎重に構成されたテストである(西行, 2015; 西行ら, 2015)。

DIRECTは30問ほどの、電気回路の諸概念をよく理解している者なら簡単な定性的推論で速やかに正解を導けるが、公式の機械的な当てはめ方略を使う者や表面的な理解にとどまっている者は誤答するように作られた多肢選択式のテストである。選択肢の中に、研究調査によって明らかになった典型的な誤概念を含めているため、科学的な概念を未だ十分獲得していない学生にとっては、そちらの選択肢の方が魅力的な回答に思われるのである。このような「ひっかけ」の選択肢はディストラクターと呼ばれている。学生の目を正答から逸らす(distract)ことが目的だからである。

このようなテストを初回の授業開始時と期末テスト時に実施し、最初に正答できなかった問題が授業修了時にどれだけできるようになったか、受講生全体の伸び率を計算する。これを規格化ゲインと呼び、その定義式は、 $g = (\langle \text{post} \rangle - \langle \text{pre} \rangle) / (1 - \langle \text{pre} \rangle)$ である。ここに $\langle \text{pre} \rangle$ 、 $\langle \text{post} \rangle$ はそれぞれ事前、事後テストのクラス平均正答率(最大値1)であり、 g は0から1までの値を取る。例えば、事前テストのクラス平均正答率が0.4で、事後テストのクラス平均正答率が0.7

の場合、 $g=0.5$ となる。潜在的に可能な $1-0.4=0.6$ の伸びのうち、 $1-0.7=0.3$ すなわち半分 (0.5) だけ伸びたということである。また、事前値が 0.7 の場合、 $g=0.5$ となるためには、事後値が 0.85 とならねばならないことも同様にして理解できるだろう。このように、初期値が異なるクラスに対しても同一のカリキュラムの効果を比較可能にするため、事前事後の平均点の伸びそのものを見るのではなく、それを事前の不正答率（潜在的に可能な最大の伸びしろ）で割ることによって規格化しているわけである。

このような指標は Hake (1998a, b) によって、“Interactive Engagement Instruction”（いわゆる協同学習やアクティブラーニングを用いたコース）の方が、“Traditional Instruction”（板書と口頭での説明による講義、問題の解き方を黒板で解説する演習、実験手順の記されたレシピ実験から成るコース）よりも有効であることの実証的証拠として導入された。Interactive Engagement Instruction の規格化ゲインの平均値は $g=0.48$ 程度なのに対して、Traditional Instruction の規格化ゲインの平均値は $g=0.23$ 程度という結果が出ている。この報告は、アメリカを中心に、高校や大学などの多くの物理教師達の実践をアクティブラーニング型に変革させることに多大な寄与をなした。それまで教育学者による哲学的な議論や、理科教育学者による「理論」的な研究によっては実践を変えることのなかった教師たちが、計量的・実証的なデータの提示を機に自らの実践を変えたのである。このことは、彼らの教える教科である物理学そのものが計量性・実証性を重んじていることと関係しているかもしれない。

このような経緯を考えると、計量的・実証的アプローチを単に教育改革を阻害するだけの、乗り越えられるべき旧弊なパラダイムと決めつけたり、紙と鉛筆によるテストをひとくくりに「悪」とみなしたりすることは適切ではないように思われる。もちろん、このような多肢選択式のテストだけで個々の学生の概念や推論を十分に明らかにできないという証拠は挙げられているが (Pride ら, 1998)、多くの場合、規格化ゲイン g は実践結果のある程度の見積もりを提供する便利なツールとして扱われている。

なお、規格化ゲインは個々の学生に対して取るのではなく、受講生全体に対して取る点が重要である。いわば、個々の学生に対する assessment ではなく、授業やカリキュラムの効果に対する evaluation として見積もられる指標なのである。このような概念調査テストは、問題が流布し、正答が知れ渡れば、本来の機能が失われてしまう。したがってこのような概念評価試験のスコアを個人の成績に反映させることは PER コミュニティの中で禁じられており、新田・塚本 (2011) においても取り扱いに関する注意喚起がなされている。

当然、本実践においても、期末試験問題は別途作成さ

れ、DIRECT というテスト名称を伏せた上で実施し、問題用紙は回収し、受講生にはこのテストのスコアが成績に含まれないことを明示している。

3.3. 振り返りレポート課題

2年目の実践において、学生に課した毎週のレポート課題は以下の通りである。

何をどのように学んだか。つまり、

- ・どんな問題を考えたか、問題の論点、本質、
- ・どんな実験をしたか、実験に使った材料の種類と数、
- ・どのように実験結果を予測して的中させたか、あるいは外したか、
- ・どのように実験結果を考え直したか、
- ・どのような議論を行ったか、どんな対立仮説があったか、
- ・どのような事柄が現時点で未解決のままになっているか、

これらを、授業を受けていない人にも理解できるように、具体的に記述してください。小中学生にもよくわかるように書いてください。文章だけでなく、図やイラスト、写真も駆使すること。

毎週の授業での学習内容を、翌週までにレポートとして、電子メールでの提出を促した。授業者はそれを読み、受講生の努力に対してねぎらいの言葉とレポートの質を向上させるためのアドバイスを返信した。アドバイスの内容は、例えば、正解だけでなく答に至る推論プロセスを記述すること、話し合いの内容についても言及すること、実験の予想には場当たりの当て推量ではなく、一貫性のある仮説に基づいた推論が必要であること、などが含まれる。

そして期末レポートにおいては、この毎週のレポートを1本のレポートに編集し、全体を読み返した上で加筆・修正を行い、最後に、自分はこの授業から何を得て、どのように変化したのか省察することを求めた。

4. 結果

4.1. インストラクショナルデザインから見たPbI

ガニエの学習能力分類 (ガニエ, 2007)、

知的技能—弁別	弁別する (discriminate)
知的技能—具体的概念	同定する (identify)
知的技能—定義された概念	分類する (classify)
知的技能—ルール	例示する (demonstrate)
知的技能—高次のルール (問題解決)	生成する (generate)
認知的方略	採用する (adopt)
言語情報	述べる (state)
運動技能	実行する (execute)
態度	選択する (choose)

を参照すると、PbI の教育目標である機能的理解は、知的技能—高次のルール（問題解決）のレベルに相当することがわかる。

また、有意意味な学習がなされるための必要条件、あるいはカリキュラム設計におけるガイドラインであるガニエの 9 教授事象は、以下のように要約されている（ガニエら, 2007）。

1. 学習者の注意を喚起する
2. 学習者に目標を知らせる
3. 前提条件を思い出させる
4. 新しい事項を提示する
5. 学習の指針を与える
6. 練習の機会をつくる
7. フィードバックを与える
8. 学習の成果を評価する
9. 保持と転移を高める

これらは、すべて教師が用意しなければならないのではなく、教材や、学習者自身に委ねることも可能であるとされている。PbI の教授方略である *elicit - confront - resolve - apply - reflect—generalize* をこれに照らしてみれば、教授事象の 1 から 6 まではテキスト（実験と練習問題と説明）が担い、7 と 8 を教師が、また 9 を宿題の問題集が提供する。もちろん、教師との議論の際に、1 から 6 の事象生起を確認し、適切なフィードバックを行う必要がある。

4. 2. 概念変化の評価

事前テストと事後テストのスコア、及び規格化ゲインの値を表 3 に示す。なお、これらの値は修了者のみのスコアを用いた値である。

表 3 規格化ゲイン

	修了者数 N	事前	事後	規格化 ゲイン _g
2014年度	13	0.53	0.68	0.31
2015年度	16	0.52	0.74	0.45

Hake (1998a) によると、規格化ゲインの平均値は、Interactive Engagement Instruction の場合が 0.48、Traditional Instruction の場合が 0.23 である。また、DIRECT の扱う範囲全てをこの実践では扱っていない（電圧や電力、回路現象の微視的な説明などは教えていない）ことを考えれば、まずまずの結果に思われる。

4. 3. 省察レポート

ここで引用するレポートは、たまたま筆者（＝実践者）にとっての実践認識を説明するのに便利であると思われたという、それだけの理由で選ばれている。その判断に

は、たとえ意識的ではないにせよ、恣意性がある。受講生一人ひとりが、分量や深さや観点の異なる省察レポートを提出しているし（2015 年度修了者は全員が提出している）、彼のグループでの協同作業がどの程度よく機能したかにも大きな差異があり、実践者によるファシリテーションのタイミングの良し悪しもまちまちであったことだろう。ここでレポートを引用することで示そうとするのは、あくまで実践者による解釈（意味づけ）であり、「これが受講生達の平均的な学びの事実である」といったような類のことを主張するわけではない。ひとえに、実践者にとってのカリキュラムの実感を読者に伝えようとする試みであって、それによってこの PbI というカリキュラムがどのような実践認識を実践者に提供し得るかの事例を示すことが目的である。

ある学生 A の省察を以下に引用し、実践者による解釈をすぐ後で示す。便宜上、段落番号を振ってある。

【A1】 私はこの授業を受けて、自分が小学校・中学校・高校で習ってきた知識を使わずに電気回路について学ぶということが難しかった。このことで授業が始まったときは、物理的な言葉を使って説明してしまい、そのことを先生から指摘され、難しかった。加えて、実験や考察を行っていく中で、自分たちが決めた専門用語を使わずに、どのような操作をするとなぜそうなるのかという説明をできるだけ完結にすることの大切さがわかった。これは、後で、自分たちが振り返るときにわかりやすくなることと、そこに参加していなかった人に説明するときにも簡潔に説明ができるという利点がある。また、この説明をするときに自分たちの常識を持ち込むということもしてはならない。これは、人によって認識している、常識は違うため、自分達の常識を持ち込んでしまっただけで、定義付けた事柄が成り立たなくなってしまうということと、実際に実験をしてみると自分たちが常識だと認識していたことが実は違うということが起こりうるからだ。このような考えで、実験をしていくうちに、自分の中でほかにもこうも考えられるのではないかと、考えられるようになり、いくつかの解決法を考えるということが身についたと考えている。

【A2】 さらにこの授業でもう一つ難しかったこととして、何人かの自分とは違う考えを持った人と、一緒に話し合いながら、実験や考察を進めていくということだ。特に、話が煮詰まってしまい、進まなくなってしまうときに、打開できなくなってしまうことだ。そのときは、様々な説が出てきてしまい、どの説のときはどのような解釈をして、その説の利点と欠点はどのようなものかということがまとめられていなかった。そのため、どのように話を進めればよいのかわからなくなっていた。その時、先生がまとめてくれたためその後の話でもどこでどの説を使えばよいのかが分かりやすくなった。この

ことから話が煮詰まってきたときは、今はなしていることをできるだけまとめるということをすべきであると考えた。

【A3】これらのことを踏まえて、実験や考察をし、自分たちで一から電気回路の定義を考えたことで、自分の中で、様々な考えが変わった。そのことを順を追って述べていく。まず、電球の明るさが、そこを流れる電流の量で変わるということだ。それまでは、電球で電流が消費されるのではないかなというあいまいな考え方ができていなかった。これは、自分たちで見つけたことではなく、教科書で説明されていた仮定としてあったのだが、その後の実験を進めていくうえで、こう考えた方が都合がいいことで消費されないと納得した。また、この授業を受けるまでは電流の流れについてもあいまいだった。このことを意識したのは、電球の並列回路の分岐点と合流点において、どのように進むのかを考えた時だ。このとき私たちの班では二つの意見が出てきて、私は、どちらの意見も正しいと思い、どちらの意見も切り捨てるができなかった。そこでどちらの意見も切り捨てずに実験を進めた結果、一方の意見では、説明することができなくなり、一つの意見に絞ることができた。

【A1】の前半では、練習 1.4「電気回路の操作的定義を書きなさい」での苦労が記述されている。「物理的な言葉を使って説明してしまい」というのは、具体的には「電流の流れ」「電子の流れ」「電流」のことである。これらの仮説的概念を使わず、電池と導線を使って豆電球が光る条件を述べるのが題意である。要するに、電池、導線、豆電球の物理的な接触・配列の有様を記述すればよい（「1つの閉じた輪っかになるように……」といった類の記述をすればよい）のであるが、多くの大学生が「電気が通るとき」「電流が流れるとき」のように回答してしまう。そこで教師は、「電気が通ってどういうこと？」「電気が通ったってどうしてわかるの？見えるの？」「はじめて回路を勉強する小学生にそれで伝わる？」などと問うことによって、これらの概念が観察事実ではなく、現象を説明するための仮説的概念であることに気づかせる。多くの学生にとって、現象の客観的な観察事実と、それを説明するための仮説的概念とは未分化である。また段落の後半においては、自分の予想・考えと実際の実験事実との相違や、知識・常識の更新可能性についても直観しているように思われる。

【A2】は、教師による議論のファシリテーションに関する記述である。教師はファシリテーションのモデルを示したようである。ここで整理した仮説が、次の段落で登場する。

【A3】は、異なる仮説の中から、どれを選択すべきかの判断基準に関して、現象を説明するのに「都合がいい」ということ、また反対に、仮説を捨てる際の根拠として現象を「説明することができない」ということを体

験的に学んでいるようである。学生の記述からは読み取れないのだが、この学生のグループで、どの仮説が最善か決着をつけるまで、ある程度の時間と実験を要している。6月8日に練習 2.6 で2つの対立仮説が出され、それが決着を着けたのは2週間後の6月22日の練習3.3であった。練習 2.6 を以下に引用する。

練習 2.6 右の回路全体の流れの様子を記述しなさい。回路が2つの並列な分岐に分かれるつなぎ目で、電池を流れる電流はどのように別れ、また合流するか、電球の明るさの観察結果はどう示唆しているでしょうか？

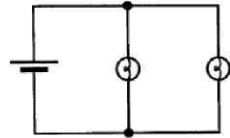


図 3：練習 2.6

同じグループの別の学生Bは、6月8日の振り返りレポートで次のように記述している。

【B】私たちの班では、コピー説と増える説の二つの意見が出た。

コピー説とは、電池から1の大きさの電流が出てきたとすると、連結点で電流の大きさはコピーされ、それぞれの電球に1の大きさの電流が流れる。そして、連結点で再び電流は1の大きさとして合流し電池へ流れていく。

増える説とは、並列に電池の数を増やしていくにつれて電池から流れる電流の大きさは大きくなり並列に電球を増やしても電池それぞれに均等な電流が流れ続ける。

「コピー説」は、電池を流れる電流はいついかなる時も一定という仮説であり、これはよく知られた典型的な誤概念である。並列分岐で電球に1ずつ流れていれば $1+1=2$ という結論に至りそうなものであるが、学生の見方は必ずしもそうではない。以下の解釈はあくまで授業者による潤色であるが、例えて言う、あたかもワープロソフトでテキストをコピーするかのように、分流時には左側の分岐を流れる「1」がコピーされて右側の分岐にペーストされ「1」を与える。また、合流の際には、右側の分岐の「1」が左側の分岐の「1」にペーストされ、上書きによってやはり「1」が与えられる。このようにして「 $1+1=1$ 」のような一見奇妙な説明が行われる。また、「増える説」というラベリングは、電流の保存という概念が念頭にある授業者には紛らわしく感じられたのだが、しかしこの学生Bにとっては、自分たちの中から出てきたものであり、しっくりきている様子だったので、あえてそのラベリングを許容して議論を行った。しかし、同じグループの他の学生（下に示す学生C）のレポートを見ると、ラベリングの仕方が異なっているため、授業者の判断は最適ではなかったようである。と

もあれ、「増える説」というラベリングでこの学生Bが言いたいことは、電池が定電流源ではない、並列分岐の追加によって増加しうる、ということである。最後の文の「電池それぞれに」は「電球それぞれに」の書き間違いであろう。

また、同じグループの別の学生Cは、省察レポートで、セクション3の練習3.3に関して、次のように記述している（この学生は熱心に議論を行っていたが、練習3.3に取り組んだ際のレポートは書かれておらず、以下に示すのは省察の時点で思い出して記述されたものである）。

【C】 ここで私が考えた説は「電池を流れる電流は一定説」である。この節は、どんな回路だろうと電池を流れる電流は一定である。しかしその回路中のほかの部分に流れる電流の量は分からない、というものである。われながらセコイと思った。この理論でいうと、どの様な回路でも電池を流れる電流の量は等しい、ですべて説明がついてしまう。だがこの説は説明できないことが多くなったので途中ではずすこととなった。

この学生Cの「電池を流れる電流は一定説」が先の学生Bの「コピー説」に該当する。「説明」という言葉が二義的に使われているが、最初の「説明」は「そのように勝手に想像することができる」程度の意味であり、後の「説明」は、現象の合理的解釈を意味しているのだろう。この記述は、この学生にとって、仮説の選択基準として、結果の予測可能性が直観されていることを示すように思われる。ただし、このような解釈を授業者が行うのは、科学的な仮説の意義として、結果の予測可能性について6月22日に議論を行っているため、その効果への期待が入っているためかもしれない。

以上、実践者による省察レポートの解釈をまとめてみたい。実践者は、学生A, B, Cの3名の省察レポートから、電気回路についての「定義」や、電流の分流・合流に関する異なる仮説の併存状況をめぐって、PbIの教授方略である認知的葛藤状況が引き起こされ、グループでの相互作用によって、互いの考えを表明し合い、科学的な概念への転換へと導かれている様子を読み取った。もちろん、このような解釈は主観的かつ暫定的なものであり、今後、実践者の認識が（学習や他者との交流、あるいは更なる思索によって）変容するにつれ、改められるべきものである。

5. 考察

PbIはグループワークを活用する点において、協同学習の一種といえる。実際、Hake (1998a,b)において、Interactive Engagement Instructionが採用している方略として、ほぼ全てのコースについて、Johnsonらの協同グ

ループ学習が挙げられている。しかし、PbIのグループワークの組織と管理については、「ソクラテス的問答法」による介入以外、特別な手立てが用意されているわけではない。Johnsonらの協同学習研究によれば、役割を与えることが重要であるはずだが。この点、PbIは実際にはペアワークを推奨していること、あるいは、少人数クラスまたはスタッフ（教師とティーチングアシスタント）と受講生の比が1:10程度の状況を想定していることもあり、大規模な教室での利用を想定していない点が理由として考えられる。

学校現場（N=30程度）や、より大きな教室サイズでは、PbIをそのまま実践することはできない。実際、石井ら（1999）は中学校での実践の際には仮説実験授業のような進行を行ったことを報告している。また、Wilson (1991)は、PbIのカリキュラムを高く評価しつつも、教員にかかる負担の大きさと、スタッフ／学生の比を欠点として挙げている。一方、Scherr (2003)は、liberal-arts collegeでの授業において、教師主導の進行に置き換え、個別点検を教室全体での議論に置き換えることによって、70人の受講生に対して限定的ながら一定の成果を得たことを報告している。Scherr自身も述べているように、このような修正を行うことは、開発者がPbIにおいて本来意図していた設計を超えて、相互作用的な講義へ教授スタイルの変更を行ったことになる。すなわち扱うべき一連の実験や設問の構成は、教授スタイルの変更にもある程度耐えられる。ただし、当然ながら「振り返りへのフィードバックが困難」であることなど、いくつかの困難が挙げられており、学生を内容に集中させるための技法が一層必要となるのは間違いない。

本研究は、PbIの有効性として、概念形成に関する側面を論じてきた。しかしながら、McDermott自身、PbIだけで教員養成のすべての側面をカバーできるなどとは主張していない。Messinaら（2005）は、PbIを学んだ教育実習生が、子どもを対象にしてPbIのような効果的な問題を設定することができなかったという事例を報告している。元々は教員研修や教員養成のためのカリキュラムとして開発されたPbIであるが、この点においてもまた一つの限界を示しているように思われる。この限界を超えるための何らかの工夫が今後検討される必要があるだろう。

Yamada (2014)は自身の実践をもとに、たとえ教師経験の浅い教員であっても、PERの先行研究とカリキュラムを参考にすることで、効果的な授業を作ることができる」と述べている。その授業開発にあたっては、単一の先行PERカリキュラムではなく、複数のPERカリキュラムを比較検討し、またその基礎となった概念調査や、他の研究者による調査研究も併用している（Yamada, 2014の引用文献リストを参照）。しかし、そこでは述べなかったことがある（当時はその重要性の認識が無かつ

たためである)。それは、授業開発にあたって、研究室の指導学生に協力を依頼し、インフォーマルなパイロットテストを行っていたことである。このような事情も考慮すると、PbI をベースにして教員養成を完遂としたならば、誘導探究の経験だけでなく、カリキュラム開発のプロセスそのものも明示的に教える必要があるのかもしれない。このような問題については引き続き検討していく必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25350241 の助成を受けた。

引用文献

- Arons, A. (1977) *The Various Language*, Oxford U. P., NY.
- Cummings, K. (2011) A Developmental History of Physics Education Research. in *The National Academies' Board on Science Education Commissioned Papers*.
- Engelhardt, P. V. & Beichner, R. J. (2004) Students' understanding of direct current resistive electrical circuits, *American Journal of Physics*, 72(1), 98-115.
- Hake, R. R. (1998a) Interactive-engagement versus traditional method: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66, 64-74.
- Hake, R. R. (1998b) Interactive-engagement methods in introductory mechanics courses. *Unpublished*.
- McDermott, L. C. (1974) Combined Physics Course for Future Elementary and Secondary School Teachers. *American Journal of Physics*, 42, 668-676.
- McDermott, L. C. (1991) Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned - Closing the gap. *American Journal of Physics*, 59(4), 301-315.
- McDermott, L. C. & Shaffer, P. S. (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994-1003.
- McDermott, L. C. & the Physics Education Group at the University of Washington (1996) *Physics by Inquiry*, John Wiley & Sons, NY.
- McDermott, L. C. & Redish, E. F. (1999) Resource Letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755-767.
- McDermott, L. C. (2001) Oersted Medal Lecture 2001: Physics Education Research - The Key to Student Learning. *American Journal of Physics*, 69(11), 1127-1137.
- McDermott, L. C., Shaffer P. S. & the Physics Education Group at the University of Washington (2002) *Tutorials in Introductory Physics*, 1st ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- McDermott, L. C. (2006a) Preparing K-12 teachers in physics: Insights from history, experience, and research. *American Journal of Physics*, 74(9), 758-762.
- McDermott, L. C. (2006b) Improving the preparation of K-12 teachers through physics education research. *American Journal of Physics*, 74(9), 763-767.
- McDermott, L. C. (2014) Melba Newell Phillips Medal Lecture 2013: Discipline-Based Education Research - A View From Physics. *American Journal of Physics*, 82(8), 729-741.
- Messina, D. L., DeWater, L. S., & Stetzer, M. R. (2005) Helping Preservice Teachers Implement and Assess Research-based Instruction in K-12 Classrooms. In Marx, L. , Heron, P., & Franklin, S. Eds., *CP790, 2004 Physics Education Research Conference*. American Institute of Physics, 97-100.
- Pride, T. O., Vokos, S. & McDermott, L. C. (1998) The challenge of matching learning assessments to teaching goals: An example from the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics*, 66(2), 147-157.
- Redish, E. F. (2003) *Teaching Physics with the Physics Suite*, John Wiley & Sons. (レディッシュ (2012) 『科学をどう教えるか—アメリカにおける新しい物理教育の実践—』丸善出版)
- Scherr, R. E. (2003) An Implementation of Physics by Inquiry in a Large-Enrollment Class. *The Physics Teacher*, 41, 113-118.
- Shaffer, P. S. & McDermott, L. C. (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, 60(11), 1003-1013.
- Sokoloff, D. R. & Thornton, R. K. (2004) *Interactive Lecture Demonstrations - Active Learning in Introductory Physics*, John Wiley & Sons.
- Wilson, K. G. (1991) Introductory Physics for Teachers, *Physics Today*, 44(9), 71-73.
- Yamada, Y. (2014) Developing Physics Education Research-Based Curriculum for Japanese University Students, In M. Sasao Ed., *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)*, The Physical Society of Japan.
- 石井・結城・田中 (1999) 「Physics by Inquiry」を活用した教材作成とその実践報告, *物理教育*, 47(6), 16-21.
- 石井・山田 (2015) Physics by Inquiryの理念と日本の物

- 理教育への示唆, *物理教育*, 63(4), 12-17.
- 植松 (2011) チュートリアル方式による物理授業の試み, *大学の物理教育*, 17, 129-132.
- ガニエ・ウェイジャー・ゴラス・ケラー (2007) 『インストラクショナルデザインの原理』北大路書房 (Gagne, R. M., Wager, W. W., Golas, K. C. & Keller, J. M.(2005) *Principles of Instructional Design*, 5th ed. Wadsworth.)
- ケラー (2010) 『学習意欲をデザインする—ARCSモデルによるインストラクショナルデザイン—』北大路書房 (Keller, J. M. (2010) *Motivational Design for Learning and Performance - The ARCS Model Approach*, Springer.)
- 西行 (2015) 電気回路概念テスト"DIRECT"の妥当性調査, 卒業論文, 未刊行.
- 西行・山田・小林(2015) 電気回路概念テスト"DIRECT"の妥当性に関する研究, *日本理科教育学会第65回全国大会論文集*, p.463.
- 塚本 (2004) 仮説実験授業の理論と, 1980年以降の英米における"新しい物理教育研究", *物理教育*, 52(2), 133-139.
- 新田・塚本 (2011) FCI (Force Concept Inventory) とは何か, *大学の物理教育*, 17, 16-19.
- 長谷川・岸澤・山崎・笠・谷口・石本・箕田・安田・湯口・藤原・新田・合田・村田・覧具 (2015) 2014物理教育の現状調査報告(1): 全体概況, *日本物理学会第70回年次大会概要集*, p.3481.
- ハル (2012) カルチャーショックを感じずにインタラクティブな物理の授業に進むこと, *大学の物理教育*, 18, 84-87.
- 安田・植松・新田 (2011) 力学概念指標 (FCI) 和訳版の妥当性評価, *物理教育*, 59(2), 90-95.
- 笠 (2010) 研究にもとづく物理教育の改善と評価, *大学の物理教育*, 16, 83-87.

An Investigation of Physics by Inquiry - the effectiveness and limitation as an elementary science teacher preparation curriculum

Yoshihide YAMADA and Kyoko ISHII

Keywords: science education, physics education, PER, Physics by Inquiry, guided inquiry

