

家庭用燃料電池の種類を選択を題材とした 「理科」探究活動導入用ゲーミング教材の開発と実践

Development and Practice of a Gaming Instructional Material for Introducing “Science” Inquiry Activities
to Select the Type of Fuel Cells for Home Use

杉原沢理* 岩屋ヶ野夏梨* 磯岡美里* 森万梨香* 近藤千香**

Takumichi Sugihara* Karin Iwayagano* Misato Isooka* Marika Mori* Chika Kondo**

* 東京工業大学 ** 東京工業大学附属科学技術高等学校

*Tokyo Institute of Technology **Tokyo Tech Hight School of Science and Technology

平成30年に改訂された高等学校学習指導要領では、教育課程編成において「総合的な学習の時間」を中心にカリキュラム設計することを目標としている。本稿では、新・逆向き設計に基づき、SDGsに関連した政策の評価を「総合的な学習の時間」で生徒が取り組めるようにするため、理科で行う探究活動の準備段階で用いるゲーミング教材の開発と実践を行った。開発した教材は、家庭用燃料電池を導入する自家発電を検討している家庭を舞台とし、制約条件に則って導入機器を精査するという問題を扱う。開発は、東京工業大学松田研究室が開発しているIAGシステムを用いて行い、実践は東京工業大学附属科学技術高等学校情報システム分野の2年生を対象とした。その結果から、縦糸・横糸モデルの定着には一定の効果が得られたが、理科的な見方・考え方の活用方法の習得については十分な効果を得られなかったため、さらなる改善の余地があることがわかった。

キーワード：理科教育法、総合的な探究の時間、新・逆向き設計、探究活動

1. はじめに

中央教育審議会答申(2016)は、総合的な学習の時間と各教科との関連付けが不明瞭である点や探究のプロセスへの取り組みが不十分である点を指摘している。さらに、生徒たちが自己の在り方生き方を考える上での各教科との関連性についても十分な追究ができていない。この原因として、探究活動において課題設定に重点が置かれ、各教科の学習内容が活用されていないという問題点が挙げられる。

これを改善するために、松田(2020)は『新・逆向き設計』を提案している。それは、総合的な学習の時間のテーマを中心として各教科で育成すべき資質・能力を設定し、その習得を目標とした通常授業を設計するというものである。教科の学習成果を活用できる課題を設定するのではなく、先に課題を設定し、その解決に活用可能な教科内容や見方・考え方の習得を目的として各教科の通常授業を設計するため、探究活動で教科学習の意義を感じやすいと想定される。

探究活動においては、日常生活でも活用できるような汎用的な問題解決能力の育成が求められる。これを達成する

ため、松田(2015)は縦糸・横糸モデルを用いた授業展開が必要だと述べている。従来の探究活動のプロセスは、「課題設定→情報収集→整理・分析→まとめ・表現」を繰り返すというものである。一方、縦糸・横糸モデルは、「目標設定過程⇒代替案発想過程⇔合理的判断過程⇒最適解導出過程⇒合意形成過程」という縦軸の各過程において、「情報収集→処理→まとめ」の横軸の手順を進める。

以上を踏まえてこれまでの理科の探究活動について考えると、専門性に偏った課題か、汎用性を意識したが故に理科の知識を必要としない課題に二極化する傾向があるという問題点が指摘できる。これでは、生徒は理科の学習成果を活用する意義を見出すことが難しい。

2. 目的

本研究では新・逆向き設計に基づき、総合的な学習の時間に扱うテーマをSDGs等に関連する政策の評価を行うことと設定し、そこで必要となる科学的な見方・考え方及び化学の知識の活用方法の習得を目的としたゲーミング教材を開発する。また、当該教材を、東京工業大学附属科学技

術高等学校の生徒に対する課題研究の事前学習として取り組み、生徒アンケート及びゲーミング教材ログ解析を行い、ゲーミング教材の効果を検証、評価する。

3. 教材の設計

3.1 教材の概要

本教材は、「化学」をはじめとする理科の学習内容や、科学的な見方・考え方の活用方法を習得させることで、課題研究への取り組みの足掛かりとなることを目的として考案されている。日常生活における課題について、提示される情報の妥当性を科学的知見と関連付けて考察する能力を問題解決能力と位置づけ、松田(2017)の縦糸・横糸モデルに基づいた構成をとる。学習者は、通常授業の学習成果を活用し、課題に関する情報収集を行い、各提案の良さや不十分な点・問題点を把握し、適切な解決策を考察する。

具体例として、自家発電を検討している家庭に焦点を当て、節約・環境保全の観点から家庭用燃料電池を導入するというシチュエーションを設定する。実際には家庭用燃料電池に多くの種類があることや、各家庭における電力需要等を加味する必要があるが、本教材では単純化のため、固体高分子系燃料電池(以下、PEFC)と固体酸化物系燃料電池(以下、SOFC)の2種類とし、①環境性、②効率、③安全性の3つの良さの観点で比較する形式をとる。

本教材の流れは、以下の通りである。まず、目標設定過程では、縦糸・横糸モデルの把握とストーリーの理解、家庭用燃料電池の基礎情報収集、良さの3つの観点の把握・整理を行う。その後、良さの3つの観点のそれぞれで、代替案発想過程と合理的判断過程を行う。環境性に関して、代替案発想過程①では、化学基礎における化学反応式の考え方をを用いて、燃料から水素ガスを生成する過程における二酸化炭素排出に関して考察する。その後、合理的判断過程①でゼロエミッションの観点から二酸化炭素排出に関してさらに考察する。効率に関して、代替案発想過程②では、化学における熱力学方程式の考え方をを使い、提示データの妥当性について考察する。その後、合理的判断過程②で理論値と実測値の誤差に言及し、データの妥当性についてさらに検討する。安全性に関して、代替案発想過程③では、化学基礎における物質の特性や電池の考え方を応用して、作動温度の安全性を考察し、合理的判断過程③で起動時間や熱回収効率も加味した検討を行う。全ての良さの観点を比較検討した後、最適解導出過程では、ここまでの検討を再整理するとともに、未検討の観点がないかを確認し、今回の家庭に合う家庭用燃料電池の種類を決定する。

3.2 目標設定過程

まず、教材の題材となる架空の家庭(3人家族)での自家発電導入の家族会議を舞台に、家庭用燃料電池が検討されていることを説明し、今後、縦糸・横糸モデルに沿って展

開していくことを示す(図1)

テーマを設定・処理

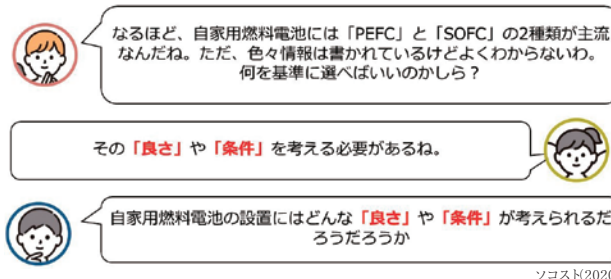


図1 目標設定過程において情報を整理する様子

家庭用燃料電池PEFCとSOFCの基礎情報を整理し、この家庭で重視する良さとして3観点(環境性・効率・安全性)を取り上げることを受容させる(図2)。

テーマを設定・まとめ

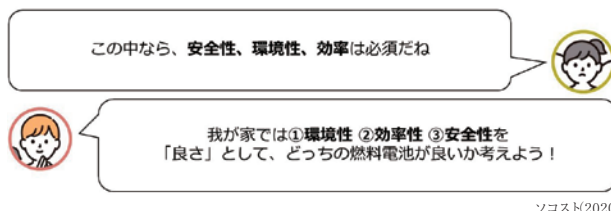


図2 目標設定過程において重視する良さを整理する様子

3.3 代替案発想過程①

ここでは、良さの3つの観点のうち環境性に関してPEFCとSOFCを比較する。検討にあたり、既習知識として化学基礎で学習した化学反応式を用い、燃料ガスから水素を製造する過程における二酸化炭素排出の有無及び燃料の種類による空気中の二酸化炭素量の増減について検討する(図3)。

化学反応式との関係では、燃料ガス化学式中にC(炭素)原子が含まれていることに着目し、反応の前後で元素の種類・数は変化しないという原則の下、C原子の行方を追い、燃料電池における水素はクリーンエネルギーであるかを調べる。

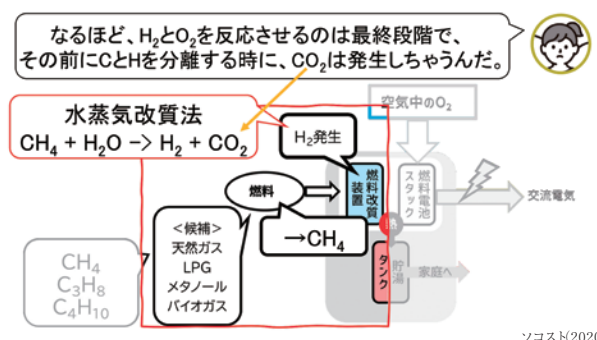


図3 水素製造における化学反応式

3.4 合理的判断過程①

代替案発想過程において、PEFC・SOFCに用いられる燃料を環境性の観点でC原子の行方を追うことによって検討したが、ここではゼロエミッションの考え方を検討を深める。代替案発想過程①の議論では、どの燃料もC原子を含んでおり、二酸化炭素の排出を避けることは不可能という結果となった。そこで、C原子の移動に着目して地球全体で見た場合の水素製造による二酸化炭素の増減に関して検討し、家庭での燃料の購入先の比較を通してこの観点における適切な家庭用燃料電池を選択する(図4)。

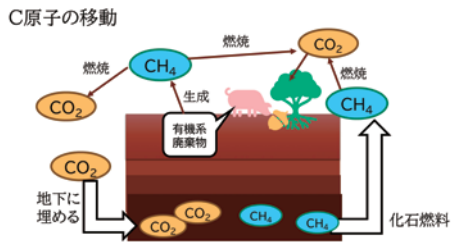


図4 C原子の移動

3.5 代替案発想過程②

ここでは、効率に関してPEFCとSOFCを比較する。検討するにあたり、既習の知識として化学で学習した熱力学方程式の考え方を応用する。反応エンタルピーを化学エネルギー、ギブズエネルギーを熱・電気エネルギー、絶対温度とエントロピーの積を廃熱と置いて燃料電池における理論効率を求め、提示データの妥当性を評価する(図5・図6)。生徒は、提示データをもとに化学の知識を活用して計算を進める。

代替案発想過程②

$$\begin{aligned} \text{理論効率} &= \frac{\text{電気} + \text{熱エネルギー}}{\text{化学エネルギー}} \\ &= \frac{\Delta G}{\Delta H} \end{aligned}$$

図5 理論効率の求め方

代替案発想過程②

化学エネルギーは仕事と廃熱(使えない熱)に分けられる

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

仕事(電気+熱エネルギー)

→ ギブズエネルギー ΔG

廃熱

→ 絶対温度 T × エントロピー ΔS

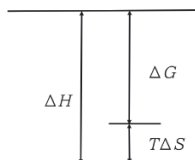


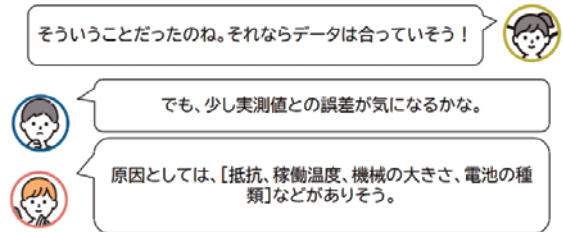
図6 エンタルピー・ギブズエネルギー・エントロピーの関係式

3.6 合理的判断過程②

代替案発想過程②での計算結果をもとに、データの妥当性を議論する。まず、今回の計算では、化学エネルギーか

ら熱・電気両方を得ている点から、理論効率で求めているものが発電効率と熱回収効率の和である総合効率であることに気づく必要があることに言及する。その後、理論値と実測値の誤差の原因について検討し、データが妥当であることを示し、家庭での電気・熱の使用量の比較を通してこの観点における適切な家庭用燃料電池を選択する(図7)。

合理的判断過程②



ソコスト(2020)

図7 理論値と実測値の誤差についての言及

3.7 代替案発想過程③

最後に、安全性に関してPEFCとSOFCを比較する。検討にあたり、作動温度の高さがどの程度かを化学の知識である既知の物質の特性と関連づけて把握する(図8)。また、作動温度が高いSOFCについて、家庭用燃料電池内の燃料改質装置、燃料電池スタック、貯湯タンクそれぞれの温度を調べ、安全性を議論する(図9)。

代替案発想過程③



70°C…エタノールの沸点
660°C…アルミニウムの融点
1064°C…金の融点

図8 物質の融点沸点と作動温度の比較

代替案発想過程③

部位	反応	温度
燃料処理装置	CH ₄ +H ₂ O → 3H ₂ +CO	500°C~ 1100°C
燃料電池スタック	H ₂ +O ₂ →H ₂ O	700°C~ 1000°C
貯湯タンク	-	約60°C

図9 SOFC内部の場所別温度

3.8 合理的判断過程③

代替案発想過程③で得た情報から、燃料電池スタックの温度のみが作動温度にあたることを踏まえ、PEFCの燃料改質装置、燃料電池スタック、貯湯タンクそれぞれの温度を調べ、燃料電池内部の温度による安全性を比較する(図10)。その後、作動温度の差から起動時間や熱回収効率に着目し、利便性の検討も加味した上で、この観点における

適切な家庭用燃料電池を選択する(図11)。

合理的判断過程③

部位	反応	温度
燃料処理装置	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$	500℃～ 1100℃
燃料電池スタック	$\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	70℃～ 90℃
貯湯タンク	-	約60℃

図10 PEFC内部の場所別温度

合理的判断過程③

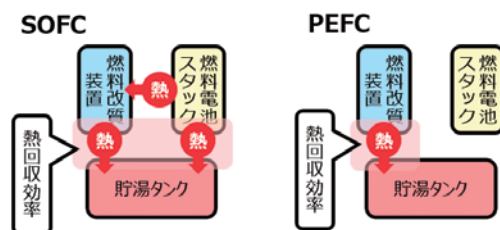


図11 熱回収効率の比較

3.9 最適解導出過程

以上、良さの3観点の議論を整理し、この家庭に導入するにはPEFCとSOFCのどちらが適切を検討する。また、未検討の観点及び自家発電方法を取り上げ、常に最適解が同じにはならないことを示唆することで、他教科との関連性を示す。

4. 実践とその結果

4.1 実践の概要

実践は、東京工業大学附属科学技術高等学校情報システム分野の2年生(出席34名)を対象として、2023年12月の補講期間中に実施した。教材には、1人1台のパソコンで取り組んでもらった。45分の授業冒頭に、プリント(付録)を配布し、必要に応じて教材内で扱うデータや家庭用燃料電池の簡略図を確認したり、プリント右面の余白部に教材の内容のメモを取ったりするように指示した。

実践対象の生徒は、縦糸・横糸モデルについて1年次の「グローバル社会と技術」の「第3章 情報モラル」で学習している。化学については1年次に化学基礎と化学領域の電池・電気分解、2年次には物理化学(状態変化、気体の性質、結晶、希薄溶液)、有機化学を学習しており、熱化学(エンタルピー)について半分ほど授業で学習している。また、7月の補講期間中に川口ら(2022)の教材を、9月初旬に松田(2023)の教材を実施している。

教材内では、表1に示した55個の発問を行う。発問2, 4, 5, 11, 13, 15, 40, 46, 49, 55は生徒に思考してもらうことを目的として自由記述形式とし、特定の正答は用意していない。一方、発問30と33～38は、自由記述形式だが正誤判定がある。それ以外の発問は選択式である。なお、誤答した場合は正解するまで解答を求める。教材からは各発問に対する生徒の回答、各スライドから次のスライドへの移動にかかった時間(回答時間)、どのような順番で生徒がスライドを移動したかについて生徒ごとにログを取る。

また、教材の効果を検証するために、教材実施前後にGoogle フォームを用いたアンケートを実施した。

表1 各発問内容と解答形式(解答形式が自由記述の場合は、紙面の有効利用のために選択肢欄を省略した)

No.	発問内容	選択肢	正解
1	図12の空欄(1)～(3)に当てはまるものは何か答えよ。	①テーマを設定, ②制約条件など(合理的判断), ③複数の解決策をまとめる	①③②
2	パンフレット(付録参照)から読み取れるPEFCとSOFCの違いを3つ答えよ。		
3	パンフレットや政策を検討する際、気を付けるべき点は何か。	①企業や政府の出しているデータは正しいため、全て信じて良い。②企業や政府の都合の良いようにデータを見せられている場合があること	②
4	家庭用燃料電池を検討する上で考えられる「良さ」や「条件」を3つリストアップせよ。		
5	「環境性、効率、安全性」の中であなたが最も重視したい物はどれか。その理由も答えよ。		
6	「複数の解決策をまとめる」の3つの過程を順に答えよ。(図13参照)	①処理, ②まとめ, ③情報収集	③①②
7	「複数の解決策をまとめる」ことを何というか。	①代替案発想過程, ②合理的判断過程	①
8	「制約条件など(合理的判断)」を何というか。	①代替案発想過程, ②合理的判断過程	②

表1 各発問内容と解答形式(解答形式が自由記述の場合は、紙面の有効利用のために選択肢欄を省略した)

No.	発問内容	選択肢	正解
9	PEFCとSOFCの燃料のうち共通で使われているものを答えよ.	①天然ガスとLPG, ②LPGとバイオガス, ③メタノールとバイオガス, ④天然ガスとメタノール	①
10	PEFCとSOFCの燃料のうち共通で使われていないものを答えよ.	①天然ガスとLPG, ②LPGとバイオガス, ③メタノールとバイオガス, ④天然ガスとメタノール	③
11	天然ガスとLPGの何について調べる必要があるか答えよ.		
12	天然ガスとLPGの主成分は何か選択肢から3つ答えよ。(インターネットでの検索可)	①CH ₄ , ②NH ₃ , ③C ₃ H ₈ , ④HCl, ⑤O ₂ , ⑥H ₂ , ⑦C ₄ H ₁₀ , ⑧N ₂ (順不同)	①③⑦
13	燃料の主成分を見て疑問に思ったことを答えよ.		
14	天然ガスやLPGは何を作るために使われるか.	①酸素, ②水素◎	
15	発問14のように考えた理由を答えよ.		
16	選択肢から適当な数字や記号を選び, CH ₄ を燃焼させたときの化学反応式を完成させよ. CH ₄ +①②→③+④⑤	(1)(4)の選択肢 ①2, ②3, ③4	①①
		(2)(3)(5)の選択肢 ①C, ②H ₂ , ③O ₂ , ④CO ₂ , ⑤H ₂ O	③④⑤
17	水蒸気改質法はNi触媒を用いてCH ₄ と何を反応させるか答えよ	①H ₂ O, ②O ₂ , ③CO ₂	①
18	水蒸気改質法ではH ₂ と何が生成されるか答えよ.	①CO ₂ , ②N ₂ , ③O ₂	①
19	CH ₃ OHを直接燃料として用いる燃料電池を答えよ	①DMFC, ②RAFC, ③TMFC	①
20	選択肢から適当な数字や記号を選び, 以下の化学反応式を完成させよ. CH ₃ OH+3/2O ₂ →①+②③	(1)(3)の選択肢 ①C, ②H, ③O ₂ , ④CO ₂ (1), ⑤H ₂ O(3)	
		(2)の選択肢 ①2(2), ②3, ③4	
21	H ₂ を作る過程ではCO ₂ は発生するかどうか答えよ.	①発生すると思う, ②発生しないと思う, ③ 	①
22	微生物が発酵させてCH ₄ を生成する生ごみ, 紙ごみ, 家畜ふん尿などの総称を何というか.	①でんぷん, ②有機系廃棄物, ③二酸化炭素	②
23	CCSによってどこのCO ₂ 濃度を低下させることができるか.	①大気中の, ②海中の, ③地中の	①
24	CO ₂ の排出量を抑えることを重視する場合は, 何から得たCH ₄ を燃料とすればよいか.	①バイオガス, ②天然ガス, ③LPガス	①
25	CO ₂ の排出量を抑えることを重視する場合, どの燃料電池を導入するのが良いか.	①PEFC, ②SOFC, ③DMFC	②
26	発電効率が優れている燃料電池はどちらか答えよ.	①SOFC, ②PEFC	①
27	熱回収効率が優れている燃料電池はどちらか答えよ.	①SOFC, ②PEFC	②
28	エンタルピーが負の場合, どのような反応が起きるか答えよ.	①発熱反応◎ ②吸熱反応	①
29	エンタルピーが正の場合, どのような反応が起きるか答えよ.	①発熱反応 ②吸熱反応◎	②
30	燃料電池においてH ₂ とO ₂ から水ができる化学反応式を書け.		2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O

表1 各発問内容と解答形式(解答形式が自由記述の場合は、紙面の有効利用のために選択肢欄を省略した)

No.	発問内容	選択肢	正解
31	反応エンタルピーとはどのようなものか下の空欄に入る形で答えよ。 反応エネルギーとは(1)(2)	(1)の選択肢 ①反応前の物質が持つ, ②反応前後に出入りする, ③反応後の物質が持つ (2)の選択肢 ①化学エネルギー, ②電気エネルギー	②, ①
32	反応エンタルピーの符号に注目すると水ができる反応はどのような反応になることが分かるか答えよ.	①発熱反応, ②吸熱反応	①
33	付録の表を参考に, PEFCの反応エンタルピーがいくつになるか小数第二位以下を四捨五入し, 小数第一位まで求めよ.		-485.2
34	付録の表を参考に, SOFCの反応エンタルピーがいくつになるか小数第二位以下を四捨五入し, 小数第一位まで求めよ.		-498.6
35	付録の表を参考に, PEFCのギブスエネルギーがいくつになるか小数第二位以下を四捨五入し, 小数第一位まで求めよ.		-450.4
36	付録の表を参考に, SOFCのギブスエネルギーがいくつになるか小数第二位以下を四捨五入し, 小数第一位まで求めよ.		-355.0
37	PEFCの理論効率を求めよ.		93
38	SOFCの理論効率を求めよ.		71
39	燃料電池の理論効率を見た際, 気になる点は次のどれか答えよ.	①理論値が約100%と高いこと, ②実測値と理論値の差, ③計算ミスの可能性	②
40	どのような点が影響して実測値と理論値の差が生まれたのか, 考えを4つ挙げよ.		
41	次のうちデータの真偽を議論する際にしてはいけないことは何か.	提示されたデータをそのまま信頼すること 理論的に考える際には無視していた様々な要素を考慮すること 理論値と実測値のデータの誤差の大きさ 理論値と実測値のデータの誤差の原因	○×××
42	PEFCとSOFCを選ぶ際に何が指標になるか. 下の空欄を埋める形で答えよ. (1)を多く使うか(2)を多く使うか	①お湯, ②電気	
43	以下の物はそれぞれ約何度か答えよ. (1)白湯(2)オープン(3)ガスバーナー	①約60℃, ②約250℃, ③約1000℃	①②③
44	燃料処理装置での反応は吸熱反応であるためどのように温度操作をする必要があるか答えよ.	①加熱し続ける必要がある, ②冷却し続ける必要がある, ③特に何もする必要がない	①
45	SOFC内の以下の各装置ではどのような温度にする必要があるか, 選択肢の中から選べ. (1)燃料処理装置(2)燃料電池スタック(3)貯湯タンク	①反応のため500℃~1100℃にする必要がある ②反応のため70℃~90℃にする必要がある ③反応のため700℃~1000℃にする必要がある ④機体の温度を上昇させるような反応は起こらない	①③④
46	温度に着目したときSOFCが危険だと決めつけるには情報不足だと考えられるのはなぜか答えよ.		
47	燃料処理装置での反応は吸熱反応であるためどのように温度操作をする必要があるか答えよ.	①加熱し続ける必要がある, ②冷却し続ける必要がある, ③特に何もする必要がない	①

表1 各発問内容と解答形式(解答形式が自由記述の場合は、紙面の有効利用のために選択肢欄を省略した)

No.	発問内容	選択肢	正解
48	PEFC内の以下の各装置ではどのような温度にする必要があるか、選択肢の中から選べ。 (1)燃料処理装置(2)燃料電池スタック(3)貯湯タンク	①反応のため500℃～1100℃にする必要がある、 ②反応のため70℃～90℃にする必要がある、 ③反応のため700℃～1000℃にする必要がある、 ④機体の温度を上昇させるような反応は起こらない	①②④
49	機体の温度について調べるにあたって気になったことを答えよ。		
50	燃料電池を起動した直後の発電効率は何通りの燃料電池の方が高くなるか答えよ。	①PEFC◎ ②SOFC	①
51	燃料電池を稼働し続けた場合何通りの燃料電池の方が熱効率が良くなるか答えよ。	①PEFC ②SOFC◎	②
52	常に燃料電池を稼働し続ける必要がある場合何通りの燃料電池を導入するのが良いか答えよ。	①PEFC ②SOFC◎	②
53	今回の教材ではどのような良さについて燃料電池を検討していたか答えよ。	①環境性、②防犯、③効率、④費用対効果、⑤安全性	①③⑤
54	今回の教材ではPEFCとSOFCの何通りの燃料電池を導入する方が良いか答えよ。	①PEFC、②SOFC	②
55	今回の教材で扱わなかった良さや代替案について挙げよ。		

4.2 実践の結果と考察①～所用時間と発問への回答

正答のある発問の結果は、表2の通りである。正答率は1回目に回答した時のものである。一方、平均所要時間は正解するまでの時間である。実践当日、代替案発想過程①の発問20でエラーが発生し、進行不能になったため、発問20と21は分析から除外した。また、エラー回避のため、代替案発想過程①と合理的判断過程①を飛ばして、代替案発想過程②から再開するように指示を出したため、発問22～25の回答者数が少なくなっている。さらに、当日は代替案発想過程③の画像の一部が読み込まれず、想定したタイミングに表示されないエラーが起きた。

教材全体の平均所要時間は31.4分であり、分布は図14の通りである。この所要時間は授業時間内での実施時間であり、教材終了までの所要時間ではない点に注意を要する。

表2 各発問の回答者数・正答率・平均所要時間

No	回答者数	正答率	No.	正答率	平均所要時間
1	33	58%			20.6 (秒)
3	34	100%			12.67
6	33	91%			14.79
7	33	97%	8	91%	17.15
9	28	100%	10	93%	30.32
12	27	85%			64.78

No	回答者数	正答率	No.	正答率	平均所要時間
14	19	68%			52.00
16	18	67%			57.33
17	15	67%	18	73.3%	51.67
19	12	83%			23.08
22	8	88%	23	100%	21.63
24	7	71%	25	57.1%	33.86
26	34	91%	27	88.2%	22.47
28	34	97%	29	97.1%	12.59
30	34	53%			92.53
31	34	74%			15.79
32	34	91%			10.68
33	34	15%	34	23.5%	196.7
35	34	62%	36	67.6%	65.94
37	33	39%	38	48.5%	115.39
39	30	93%			10.97
41	30	37%			44.90
42	30	57%			17.43
43	29	100%			15.59
44	29	76%			22.07
45	29	28%			58.90
47	22	91%			8.95

No	回答者数	正答率	No.	正答率	平均所要時間
48	22	27%			33.00
50	18	72%			9.06
51	18	89%			8.33
52	18	72%			8.28
53	18	72%			15.44
54	18	72%			6.50
55	18	83%			31.35

※同じ行に複数の発問Noがあるのは、1画面が複数の発問で構成されている場合である

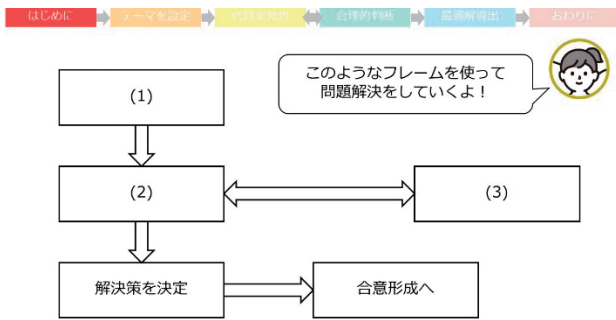


図12 縦糸・横糸モデルの縦糸についての発問

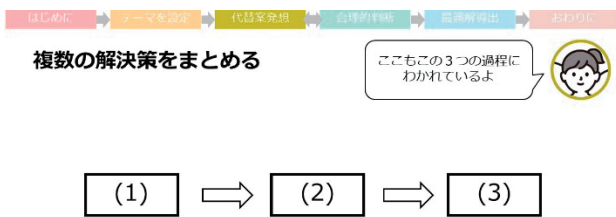


図13 縦糸・横糸モデルの横糸についての発問

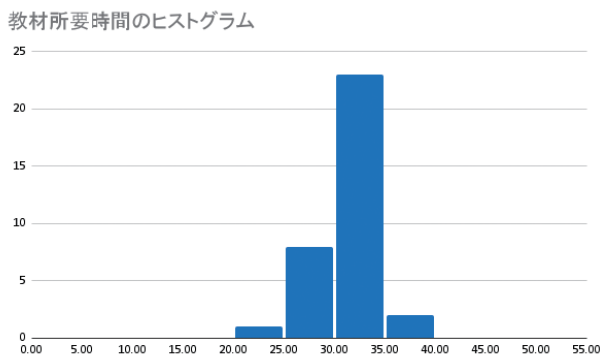


図14.教材所要時間のヒストグラム

以下、表3～9に、正答率が50%を切っている発問における詳細なデータを示す。

表3 発問33 (正解は-485.2) での誤答の回答別人数

解答	485.2	-483.2	-489.2	-242.6	-285.84	242.6	誤操作
人数	1	2	1	9	1	1	14

表4 発問34 (正解は-249.3) での誤答の回答別人数

解答	249.3	-177.5	-249.3	355.0	-285.84	誤操作
人数	1	1	8	1	1	14

表5 発問37 (正解は93) での誤答の回答別人数

解答	92	91	90	108	57	誤操作
人数	2	1	1	1	2	13

表6 発問38 (正解は71) での誤答の回答別人数

解答	70	35	140	誤操作
人数	1	2	1	13

表7 発問41 (正解は○×××) での誤答の回答別人数

解答	×,○,○,○	○,×,○,×	○,×,○,○
人数	16	2	1

表8 発問45 (179) 解答数

項目\選択肢	①	②	③	④
燃料処理装置	26	1	2	0
燃料電池スタック	8	2	19	0
貯湯タンク	5	13	0	11

表9 発問48 (187) 解答数

項目\選択肢	①	②	③	④
燃料処理装置	20	0	2	0
燃料電池スタック	1	6	14	1
貯湯タンク	0	1	0	21

図14のヒストグラムから、全ての生徒が20分以上の時間をかけて実施している。熊谷ほか(2023)のゲーミング教材における所要時間のヒストグラムとの比較や、表2の正答率も確認すると、教材の内容を把握せずに短い時間で演習を終わらせてしまう生徒が少なかったことが分かる。このことから、発問数を多く設置することで主体的に取り組む生徒の割合が増えたと考えられる。

また、表2から分かるように合理的判断過程②の発問36まで全ての生徒が演習を行うことができていた。しかし、教材を最後まで実施することができたのは18人であること

が分かる。ゲーミング教材を演習時間内に終わらせるためには発問頻度を維持したまま代替案発想過程・合理的判断過程をそれぞれ3回から2回に変更することが最適だと考えられる。

表2から、発問全体の正答率は平均72%と非常に高い。これは、多くの発問で選択肢が少なく、スライドを読んだり、配布されたプリントから情報を集めたりすることで解ける問題が多かったからだと考えられる。また、この正答率の高さから教材の内容について時間内に扱ったところまでは生徒は理解できていると予想できる。

その中で正答率が50%を下回った発問に着目すると、発問33、34は計算問題であった。問題で活用する数値については教材内の発問直前のスライドや、配布されたプリントに数値が書いてあり、生徒は計算を行うのに十分な情報を持っていた。表3、表4を見ると誤答としては誤操作が一番多い。今回のゲーミング教材ではEnterを押すと次に進む仕様になっていたため、自由記述形式では誤操作が多いと考えられる。次に誤答として多かった-242.6と-249.3は、配布されたプリントに書かれた数値をそのまま入力したものである。このことから配布されたプリントから活用する数値を正しく引き出すことは出来ているが、PEFC、SOFCの反応エンタルピーがH₂Oの反応エンタルピーの2倍になるという物質の関係性を考慮できていなかったと推測される。似た傾向の発問35、36については、表2を見ると発問33、34での経験を活かして正答率が上がっていると考えられる。

発問37、38も計算問題だった。表5、表6から正答率低下の原因は誤操作だと分かる。それ以外の誤答も正答に近い数値であり、計算ミスが原因だと推測される。

発問41では、表7に示す通り、一番多い誤答は正答と○×が全く逆転した「×,○,○,○」であった。この発問は「してはいけないこと」を「○」と回答するものだが、「してはいけない」に「×」を回答すると誤解した可能性がある。

表8から分かる通り貯湯タンクについての項目が発問45の正答率を下げている主な原因である。表9を見ると全く同じ形式だったにもかかわらず貯湯タンクの項目の正答率が高くなっていることが分かる。このことから4節で記載した通りスライドがズレていたため正しく情報が伝わらなかったことが正答率を下げている原因であったと考えられる。

4.2 実践の結果と考察②～事前・事後アンケート

教材実施前後に回答してもらったアンケートの集計結果を表10～表19に示す。

表10と11は縦糸・横糸モデルの定着を確認している。表10の通り、縦糸の手順はほとんどの生徒が事前から正しく答えている。また、横糸については、実践前は正答率が低かったが、実践後には半数以上の生徒が正しく答えることができていた(表11)。以上より、本教材は縦糸・横糸モデルの定着について効果があったと考えられる。

表10 「政策評価の問題解決の順番は？」(事前/事後)

	1番目	2番目	3番目	教材中に無い
複数の解決策をまとめる・制約条件などを再検討する(代替案発想/合理的判断過程)	0/2	27/30	7/2	-/0
テーマを設定(目標設定過程)	33/32	0/2	1/0	-/0
解決策を決定(最適解導出過程)	1/0	8/2	25/31	-/1
合意形成	-/0	-/1	-/1	-/32

表11 「政策評価の各過程の手順は？」(事前)

	1番目	2番目	3番目	手順/教材中に無い
処理	0/0	6/24	16/10	12/0
まとめ	0/0	1/4	21/24	12/6
情報収集	11/28	22/5	0/1	1/0
現状確認	23/5	5/2	0/0	6/27

表12～14は、問題解決を行うにあたり、生徒が情報やデータの信頼性を判断するための視点を持っているかを確認している。

表12 「企業や国が発信する情報について注意すべき点」

	事前	事後
メリットが誇張されている可能性がある	30	34
デメリットが記載されていない可能性がある	33	33
専門的な知識が必要となるため疑ってはいけない	2	2
政策を提案する人が都合の良いデータだけを使っている可能性がある	33	33

表13 「化学反応に関する議論で気をつけるべき点」

	○の人数	
	事前	事後
反応前の物質(原料)が何か	34	33
反応前の物質(原料)の同素体が何か	19	15
反応前後に色の変化がないか	27	19
反応式の前後で、出てくる原子に整合性があるか	32	32

表14 「データの真偽を議論する際に気をつけるべき点」

	○の人数	
	事前	事後
提示されたデータをそのまま信頼すること	1	8
理論的に考える際には無視していた様々な要素を考慮すること	31	26
理論値と実測値の誤差の大きさ	31	29
理論値と実測値の誤差の原因	34	28

表12「企業や国が発信する情報について注意すべき点」の通り、ほとんどの生徒が情報を鵜呑みにする危険性を理解しているといえる結果が得られた。事前・事後での差がほぼないことから、ゲーミング教材が情報の扱い方を再確認することに役立ったと考えられる。また、理科的な見方・考え方をを用いた化学反応の議論に関しては、ほとんどの生徒が「反応前の物質(原材料)が何か」及び「反応式の前後で、出てくる原子に整合性があるか」に気を配ることができていた(表13)。この項目に関して、事前・事後で回答した生徒がほぼ全員であることから、化学反応に関する前提知識がしっかりと身につけているのだと考えられる。理科的な見方・考え方をを用いたデータの議論に関しては、過半数の生徒が誤差や現実的な問題要素に関して気をつける必要があると回答している(表14)。一方で、表14から事前・事後でその意識が薄れた生徒が数名いることが読み取れる。これは期待していた結果とは反対のものであった。実験における考察では重要視される項目にも関わらず、このような結果となった原因として、教材内での言及の仕方が曖昧だったことが考えられる。「データに疑問を持つ視点や整合性、誤差の原因を探ろうとする考えが大事」という文言により、考えを持つことそのもののみに重要性を見出してしまったのではないと思われる。ゲーミング教材内で生徒に身に付けて欲しい力は明記する必要がある。

表15 「世の中の問題を理科の学習成果を使って分析しようとした時、その準備は大変だと感じるか」

質問61\質問70	1	2	3	4	5
1	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	3
3	0	0	2	3	3
4	0	0	3	0	5
5	1	0	1	4	7

※全く感じない場合は1の方向へ、強く感じる場合は5

表16 「理科の学習成果を使って世の中の問題を分析することは重要?」

質問62\質問71	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	1	0	2	4
4	1	0	0	2	8
5	0	0	3	5	8

※全くそう思わないは1の方向へ、非常にそう思うは5

表17 「理科の学習成果を使って世の中の問題を分析することは楽しい?」

質問63\質問72	1	2	3	4	5
1	0	0	0	1	0
2	0	1	1	1	0
3	1	2	3	4	5
4	0	0	5	0	5
5	0	1	1	2	1

※全くそう思わないは1の方向へ、非常にそう思うは5

表18 「今回検討した観点は?」「永田家では各観点に関しPEFCとSOFCのどちらが良いという結論?」(事後)

	PEFC	SOFC	どちらも変わらない	検討していない
環境性	5	8	10	11
費用対効果	7	3	4	20
効率	10	20	1	3
安全性	6	7	12	9
防犯	1	1	2	30

表19 「本教材は課題研究の役に立つ」(事後)

	1	2	3	4	5
人数	0	4	10	10	10

※全くそう思わないは1の方向へ、非常にそう思うは5

表15の「世の中の問題を、理科で学んだことを使って分析しようとしたとき、その準備は大変だと感じるか」については、事前・事後の平均がそれぞれ3.8、4.3であり、実践前より実践後の方が大変と感じた生徒は16名、逆に実践後より実践前の方が大変だと感じていた生徒は9名と、実践後の方が大変だと感じる傾向が見られた。ただし、この結果は、学習への動機づけにもなりうる。そこで、表16で

は、そのような分析が重要かを聞いており、事前・事後の平均がそれぞれ4.3、4.4と高いまま維持されている。また、そのような分析が楽しいかを聞いた結果(表17)も、平均値が3.4から3.7に上がっており、実際に動機づけは高まったと解釈される。ただし、実践前から実践後に評価が低下した生徒が15人いた。教材内の発問の1回目の解答の正答率や事後アンケートで行った教材理解を確認する問の正答率を調べると、二極化していることがわかった。このことから、理科が得意だが題材が簡単だったため興味を失ってしまった生徒、反対に理科が苦手なうえ内容が難しかったため興味を失ってしまった生徒がこのような傾向を示したのではないかと考えられる。以上より、双方が興味を持って取り組めるような教材の工夫を考える必要がある。

表18の質問は、教材内での活動がどの程度記憶に残っているかを確認するものであった。「費用対効果」「防犯」の項目は「検討していない」、「安全性」の項目では「どちらも変わらない」、「環境性」「効率」項目は「SOFC」になることを想定して教材を作成した。しかし、表18から分かる通り意図したものからは大幅に離れた結果となった。これは「環境性」について議論する予定だった代替案発想過程①、合理的判断過程①が実施できなかつたこと、「安全性」「効率」について議論する予定だった代替案発想過程③、合理的判断過程③が実施できなかつた生徒が多かつたことが原因だと考えられる。

5. 課題と改善点

本教材は理科的な見方・考え方の活用方法の習得に向けて作成してきた。しかし、今回の事後アンケートのような教材内で扱われた内容についての質問を行うと、理科的な見方・考え方の活用方法ではなく、使用した教材の理解度を測定してしまうため、生徒が実際に理科的な見方・考え方の活用方法を習得できたかを評価することができなかつた。理科的な見方・考え方の活用方法は題材に依存しないものであるため、より正確に教材の効果を評価するためには実践で使用する教材とは全く違う題材の教材を開発して評価を行うべきである。

また、生徒の政策評価に対する姿勢については特定の生徒にしかアプローチすることができなかつた。これは生徒の興味分野の傾向や習熟度の状況に依存するものだと予測できるため、事前アンケートの項目として生徒に関する情報を収集する項目を追加する必要がある。

次に教材についての課題であるが、発問数を増やすことでかなり高い正答率を維持することができた。しかし、最後までゲーミング教材を実施できた生徒が少なかつたため教材の内容を完璧に理解できている生徒は少なかつた。今回の発問頻度を維持したまま、代替案発想過程、合理的判断過程の数をそれぞれ2回に減らすことが最適だと考えら

れる。また、2か所のエラーと、出題意図の読み取りにくい発問については修正を行う必要がある。記述形式の発問については事前に入力方法について指示を出したうえで、ゲーミング教材内でも注意を促す文面を入れる必要がある。

6. まとめ

本稿では、理科の探究活動における指導教材としてのゲーミング教材を作成し、実践を通して効果を検証した。ゲーミング教材に設定した発問や生徒から得られたアンケート結果から縦糸・横糸モデルの定着には一定の効果が得られた。しかし、理科的な見方・考え方の活用方法の習得については十分な効果を得られなかつた。生徒の政策評価に向き合う姿勢については特定の生徒にしか効果を示さなかつた。今後もゲーミング教材を開発するにあたって改善を行う必要がある。また、本教材は化学を題材として取り上げたが、物理や生物、地学といった様々な分野を横断的に扱える題材に変えることでより深い学びに繋がることが期待される。

謝辞

本教育実践研究を進めるにあたり、東京工業大学の松田稔樹教授、永原健太郎講師、東京工業大学附属科学技術高等学校の先生方、ならびに情報システム分野2年生にご協力いただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 川口万太郎, 蓮見眞由香, 服部竜大, 浜瀬理紗子, 山川萌恵, 油布稜平, 近藤千香(2023)電柱地中化政策を題材とした理科「探究活動」導入教材の開発と実践, *Informatio*, 20, 31-36
- 熊谷健太, 杉原沢理, 岡本敬, 濱名高宏(2023)電柱地中化政策を題材とした数学「課題学習」導入教材の開発と実践, *Informatio*, 20, 19-30
- ソコスト.「家族」. <https://soco-st.com/>, (参照2023-12-15)
- 松田稔樹(2015) 情報科教育で扱うべき問題解決活動の明確化と授業・教材の設計指針, *Informatio*, 12, 37-43
- 松田稔樹(2018)「縦糸・横糸モデル」を基盤とするインフォームな指導を行うゲーミング教材の提案とその開発支援, *シミュレーション&ゲーミング*, 27(2):49-60
- 松田稔樹(2020)「総合的な学習の時間」から各教科に向けた逆向き設計の指導, 日本教育工学会研究報告会集, JSET20-4, pp.103-110
- 松田稔樹(2023)「総合的な学習の時間」から各教科に向けた逆向き設計の指導, 日本教育工学会研究報告会集, JSET20-4, pp.103-110

付録 実践で生徒に配布したプリント左面(右面は余白)

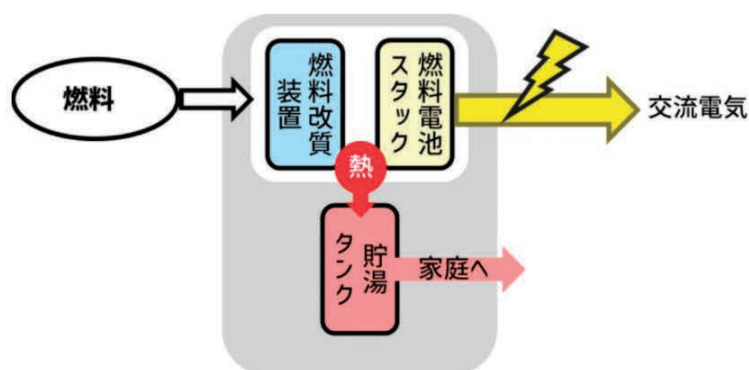
ゲーミング教材(理科)

氏名： _____

●家庭用燃料電池のパンフレット情報

種類	固体高分子系 PEFC	固体酸化物系 SOFC
電解質	固体高分子膜	ジルコニア系セラミックス
媒体イオン	H ⁺	O ²⁻
作動温度	70~90℃	700~1000℃
使用燃料	天然ガス、LPG、CH ₃ OH etc...	天然ガス、LPG、バイオガス etc...
反応式	燃料極 H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	O ₂ + H ₂ → H ₂ O + 2e ⁻
	空気極 O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O	O ₂ + 4e ⁻ → 2O ²⁻
発電効率	40%	52%
熱回収効率	57%	35%
本体価格+設置費用	93万円(75万+18万)	118万円(101万+17万)

●家庭用燃料電池の構造図



●反応エンタルピー・ギブズエネルギー表 (H₂O(気体)1 molあたり)

温度(℃)	反応エンタルピー ΔH(kJ/mol)	温度(℃)	ギブズエネルギー ΔG(kJ/mol)
100	-242.6	100	-225.2
400	-245.3	400	-210.3
600	-246.9	600	-199.7
800	-248.2	800	-188.9
1000	-249.3	1000	-177.5

●事後アンケート

教材改善に活用させていただきます。
ご協力をお願いします。

事後アンケート用フォーム→

