

廃棄うどんを用いた高効率水素生成プロセスの
設計と最適化

船越 温

香川県立高松高等学校 普通科 2 年

(〒760-0017 香川県高松市番町 3 丁目 1 番 1 号)

廃棄うどんを用いた高効率水素生成プロセスの設計と最適化

研究概要

本研究では、大部分が未利用のまま処分されている廃棄うどんの有効活用を目指し、熱化学的特性の評価および水素生成プロセスの設計・最適化を行った。香川県では年間約 3000 t のうどんがそのまま廃棄されている一方で消費エネルギーの 9 割は国外に依存している。この問題を解決する方法として廃棄うどんのエネルギー化による、循環型都市づくりを目指した。はじめに、半生、生、ゆでの 3 種類のうどんについて含水率を測定し、さらに、半生うどんを用いた TG-DTA 測定を行った。その結果、比較的低温域で熱化学分解が進む可能性が示された。これらの結果を基に、Aspen Plus v.14 を用いて水素生成プロセスを設計し、ガス化温度および BFW 流量について感度分析を行ったところ、システム効率は最大 65.8%を示した。この値は一般的なバイオマスガス化プロセスと同等水準であり、廃棄うどんが熱化学的プロセスを通じて高効率にエネルギー利用できる可能性が示された。以上より、廃棄うどんは未利用食品廃棄物の新たな活用法として有望であり、地域資源循環型の水素エネルギーシステムの構築に寄与し得ると考えられる。

1. 研究の背景と目的

1.1 食品廃棄とうどん廃棄の現状

世界では食品廃棄が大きな課題となっており、日本においても未利用の食品廃棄物を資源として活用することが求められている。特に香川県では、うどんの生産・消費が盛んであり、県民 1 人当たりの年間うどん消費量は 230 玉、県内には 800 軒以上のうどん店が存在する。その一方で、製造工程で生じる切れ端や、提供後に廃棄される麺などにより、香川県では年間 3,000 トン以上のうどんが廃棄されているとされる。^[1] 廃棄うどんはデンプンを多く含み、本来エネルギー源となり得るにもかかわらず、十分に活用されないまま失われている。

1.2 食品廃棄物のエネルギー化と本研究の位置づけ

うどん廃棄物にはメタン発酵の報告はあるが、熱化学的プロセスによる水素生成を検討した例は確認されなかった。一方、日本の一次エネルギー供給の 9 割は海外に頼っている。これらを踏まえ、廃棄うどんのエネルギー化による地域資源循環の仕組み構築は重要であると言える。

1.3 水素生成を対象とする理由

本研究で水素生成を対象とした理由は、水素が多様な用途へ展開できるエネルギー媒体であることに加え、熱化学的プロセスとの親和性が高いと考えられるためである。(図 1)

1.4 研究の目的

廃棄うどんから水素を高効率に生成できる条件を明らかにし、廃棄うどんの新たなエネルギー利用可能性を示すために、熱化学的プロセスによる水素生成プロセスの設計と最適化を行うことを目的とした。

2. 方法

2.1 試料

本研究では、試料として半生うどん、生うどん、ゆでうどんの 3 種類を用いた。これらは株式会社讃岐麺業の製品を用いた。含水率測定には 3 種類すべてを用い、TG-DTA 測定には半生うどんを乳鉢ですり潰して粉末化したものを用いた。(図 1)

また、Aspen Plus によるプロセス設計では、実際の廃棄形態としてゆでうどんの排出量が多いことを考慮し、半生うどん 20 kg/h、ゆでうどん 80 kg/h を原料投入条件として設定した。

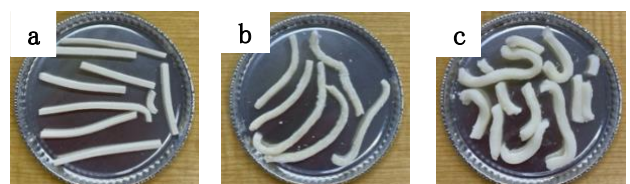


図 1 廃棄うどん試料(a:半生,b:生,c:ゆで)

2.2 含水率測定

測定条件は運転温度 105 °C、運転時間 150 分とした。半生うどん、生うどん、ゆでうどんについてそれ

それぞれ2回ずつ測定を行い、その平均値を各試料の含水率とした。含水率の算出にあたっては、測定終了時に重量が一定となることを確認した。(図2)



図2 水分計

2.3 TG-DTA 測定

試料には半生うどんの粉末試料を使用した。測定条件は、20℃から100℃まで20℃/minで昇温し、100℃で15分保持した後、100℃から900℃まで20℃/minで昇温し、900℃で30分保持する条件とした。(図3)



図3 TG-DTA

2.4 Aspen Plus によるプロセス設計と評価方法

2.4.1 Aspen Plus によるプロセス設計

水素生成プロセスの設計には Aspen Plus v.14 を用いた。プロセスは、乾燥、ガス化、シフト反応、分離の各工程から構成した。

HX1 および FLASH では、ゆでうどんの乾燥を行った。COMP では分離された水蒸気を加圧し、乾燥工程の熱源として利用した。MIXER1 では乾燥後のゆでうどんと半生うどんを混合し、GASIFIER に供給した。GASIFIER には RGibbs を使い、ガス化炉を平衡反応器としてモデル化した。MIXER2 ではガス化生

成物と BFW を混合し、HEATER でシフト反応に必要な温度まで昇温した。SHIFT-RX には REquil を使い、 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ の平衡反応を 350℃、1 bar で計算した。HX2 ではシフト反応後の高温流体を用いて BFW を加熱し、冷却と熱回収を兼ねた。最終段には分離ブロックとして PSA を配置し、水素を分離する構成とした。これは分離工程の厳密設計ではなく、全体最適条件の導出を目的としたため、PSA は簡略化モデルとして扱った。圧力条件は、COMP を除き基本的に 1 bar とした。COMP の吐出圧力は 3 bar とした。BFW はシフト反応の水として供給するとともに、HX2 において冷却媒体としても用いた。(図4)

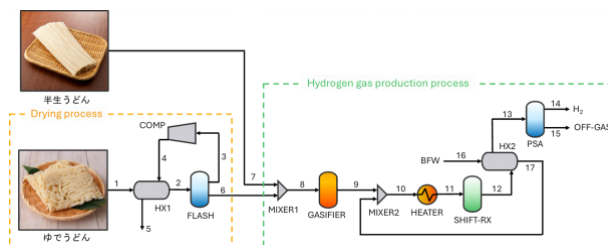


図4 プロセスフロー

2.4.2 システム効率の定義

プロセス評価には、生成した水素のエネルギーと投入エネルギーとの比で定義されるシステム効率 η_{system} を用いた。システム効率は下の式により求めた。

$$\eta = \frac{E_{\text{H}_2}}{E_{\text{feed}} + W_{\text{COMP}} + W_{\text{GASIFIER}} + W_{\text{HEATER}}}$$

ここで、 E_{H_2} は生成水素のエネルギー、 E_{feed} は原料うどんの化学エネルギー、 W_{COMP} は COMP で必要な動力、 W_{GASIFIER} および W_{HEATER} はそれぞれ GASIFIER および HEATER における投入エネルギーを表す。原料のエネルギー値には日本食品標準成分表を用いた。なお、本効率計算では補助動力や詳細な補機エネルギーは考慮していないため、理想化した条件に基づく評価である。

2.4.3 感度分析条件

最適条件を導出するため、ガス化温度および BFW 流量を変数として感度分析を行った。ガス化温度は 700～1000℃、BFW 流量は 25～75 kg/h とした。各条件におけるシステム効率を算出し、その最大値を

与える条件を最適条件とした。

3. 結果と考察

3.1 含水率測定結果と原料適性

半生うどん、生うどん、ゆでうどんの含水率を測定した結果、それぞれ 20.8%、29.4%、66.4%であった。半生うどんは 3 試料の中で最も低い含水率を示し、ゆでうどんは著しく高い含水率を示した。ゆでうどんでは水分が多いため、熱化学のプロセスに適用する際には乾燥工程が重要となることが分かる。一方、半生うどんは水分が比較的少なく、熱化学分解に適した含水率に近い^[2]ことから、原料として有利であると考えられる。(図 5)

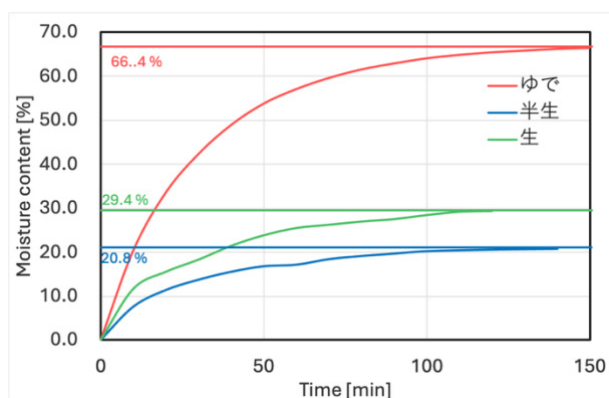


図 5 含水率測定結果

3.2 TG-DTA 測定結果と熱化学的特性

半生うどん粉末の TG-DTA 測定を行った結果、20～125℃の範囲で乾燥に対応する質量減少が見られ、170～570℃の範囲で顕著な質量減少が確認された。また、プロセス全体では約 19.1 mg の質量減少が生じ、そのうちガス化に相当する質量減少は約 13.9 mg であった。これらの結果から、うどん中の有機成分は比較的低い温度域から熱分解・ガス化を開始し、570℃付近までに主な分解が進行することが分かった。(図 6)

一般的に、バイオマスや有機性固体の熱分解・ガス化にはより高温域が必要とされることが多いが、本研究で用いたうどん試料では比較的低温域から質量減少が進行した。これは、主成分がデンプン質であり、木質系バイオマスのように難分解性成分を多く含まないためと考えられる。したがって、廃棄うどんは熱化学のプロセスに適した原料であり、比較的短時

間かつ低温側で反応を進められる可能性がある。Aspen Plus によるプロセス設計では 700～1000℃の範囲で感度分析を行ったが、これは TG-DTA で確認された分解温度域より十分高い条件を設定し、反応をより完全に進行させることを意図したものである。

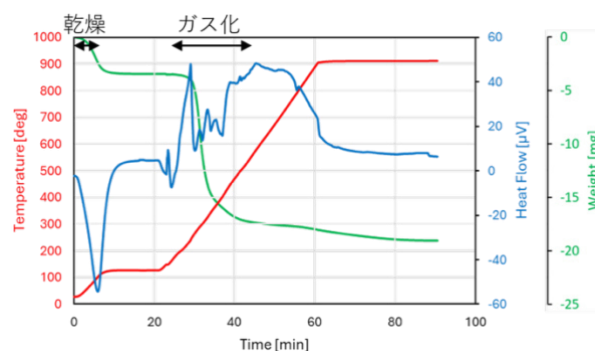


図 6 TG-DTA 測定結果

3.3 Aspen Plus によるプロセス設計結果

3.3.1 プロセス概要

本プロセスでは、ゆでうどんの高い含水率に対応するため乾燥工程を組み込み、さらにシフト反応に必要な水を BFW として供給した。ここで、BFW は単なる反応用水ではなく、シフト反応の進行と熱回収の両方に関わる重要な変数となる。したがって、本研究ではガス化温度とともに BFW 流量を感度分析の対象とした。(図 7)

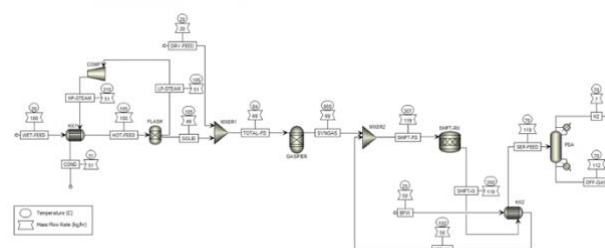


図 7 Aspen Plus を用いて設計した水素生成プロセス

3.3.2 ガス化温度・BFW 流量の最適化

ガス化温度を 700～1000℃、BFW 流量を 25～75 kg/h の範囲で変化させて感度分析を行った結果、ガス化温度 700℃、BFW 流量 55 kg/h のとき、システム効率は最大 65.8%を示した。(図 8)

高温条件では昇温に必要なエネルギーが大きくなり、システム全体としては効率が低下する。そのため、反応進行と投入熱量の両立が図られる 700℃

付近で最適値が得られたと考えられる。

また、BFW 流量については、少なすぎる場合にはシフト反応に必要な水量が不足し、十分に反応が進行しないだけでなく、PSA 入口温度が高くなり計算上の不具合も生じた。一方、多すぎる場合には HEATER で加熱すべき流量が増加するため、投入エネルギーが増大し、結果としてシステム効率が低下した。したがって、BFW 流量 55 kg/h は、シフト反応に必要な水量を満たしつつ、加熱負荷の増大を抑える条件であったと解釈できる。

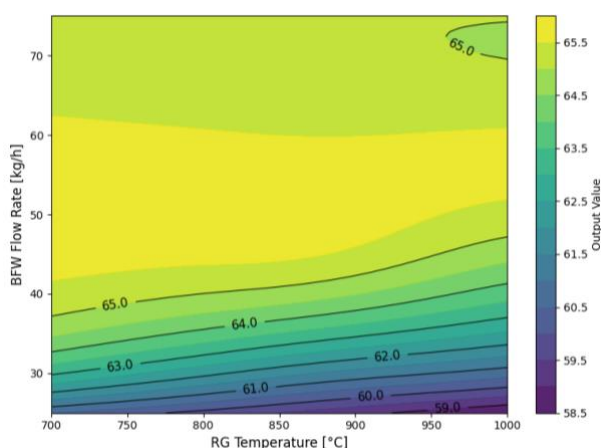


図 8 ガス化温度と BFW 流量の最適条件

4. 結論と今後の展望

4.1 結論

本研究では、廃棄され未利用のままエネルギーを損失しているうどんの有効活用を目指し、熱化学的特性の評価および水素生成プロセスの設計・最適化を行った。その結果、半生うどん、生うどん、ゆでうどんの含水率はそれぞれ 20.8%、29.4%、66.4%であり、半生うどんは熱化学分解に適した含水率に近いことが明らかとなった。さらに、TG-DTA 測定より、うどんの主な熱化学分解は 170～570 °C の範囲で進行することが確認され、廃棄うどんが熱化学プロセスに適した原料である可能性が示された。

これらの結果を基に、Aspen Plus v.14 を用いて水素生成プロセスを設計し、ガス化温度および BFW 流量について感度分析を行った。その結果、ガス化温度 700 °C、BFW 流量 55 kg/h において、システム効率は最大 65.8%を示した。これは、廃棄うどんを原料としても、高効率な水素エネルギー化が可能であることを示す結果である。

以上より、廃棄うどんは熱化学プロセスを用いた水素生成原料として有望であり、未利用食品廃棄物の新たなエネルギー利用法となり得ることが示された。

4.2 今後の展望

本研究では、平衡計算に基づくプロセス設計により最適条件を導出したが、タール生成、補助動力、詳細な分離性能、実機スケールでの熱損失などは考慮していない。したがって、今後はこれらを考慮したより現実的なプロセス評価が必要である。特に、PSA を含む分離工程の詳細条件、補機を含めたエネルギー収支、および実機運転を想定した条件設定を導入することで、システム評価の精度を高める必要がある。

また、香川県のように廃棄うどんが継続的に発生する地域では、製麺工場や工業地帯と組み合わせた導入可能性も考えられる。とくに、乾燥工程や昇温工程に工業排熱を活用できれば、外部エネルギー投入を低減できる可能性がある。今後は、こうした熱利用条件も含めたプロセス改良に加え、地域内での資源循環性や環境負荷を評価するため、LCA の観点からの検討を進めたい。

さらに、本研究で得られた知見は、主成分がデンプンである他の食品廃棄物にも応用できる可能性がある。したがって、今後は廃棄うどん以外のデンプン質食品廃棄物にも対象を広げ、食品廃棄物の熱化学的エネルギー利用の汎用化についても検討したい。

5. 謝辞

本研究では、東京大学 生産技術研究所 Aziz 研究室の Aziz Muhammad 先生、阿部氏のご協力をいただきました。また、本研究は JST 次世代科学技術チャレンジプログラム(STELLA)において東京大学 UTokyoGSC-Next の一環として行われました。心より御礼申し上げます。

6. 参考文献

- [1]<https://www.pref.kagawa.lg.jp/documents/14842/udon3.pdf>
- [2]https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953423002751?utm_source=chatgpt.com