

令和３年度製造基盤技術実態等調査事業

（水素航空機の実現に向けた空港における
水素関連インフラの在り方に関する調査）

調査報告書

令和４年３月



みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

<空白ページ>

<目次>

1	事業の目的・内容	1
1.1	事業目的.....	1
1.2	事業の実施内容.....	1
2	水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施.....	3
2.1	検討会の概要	3
2.2	開催状況.....	4
3	水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施に向けた事前調査.....	5
3.1	水素航空機等の研究開発動向	5
3.2	空港の類型化	9
3.3	コスト試算	18
3.3.1	コスト試算の前提.....	18
3.3.2	コスト試算の方針.....	24
3.3.3	水素航空機導入初期のコスト試算（導入初期－1）	27
3.3.4	水素インフラの設備規模の検討（導入初期－2、導入中期）	36
4	コスト試算に関する分析と空港周辺インフラの課題整理	41
4.1	空港の類型化の実施	41
4.2	コスト試算のシナリオについて	42
4.3	各設備の想定について.....	45
4.4	コスト試算に関する分析.....	47
4.5	コスト試算における課題について.....	53
4.6	その他の課題について.....	54
5	まとめ.....	56

<空白ページ>

1 事業の目的・内容

1.1 事業目的

近年、国際民間航空機関（ICAO）が 2020 年以降、国際航空に関して CO₂排出量を増加させないとの目標を採択するなど、航空機産業においても、低炭素化に向けた要求が強まりつつある。こうした中、革新的な低炭素化関連技術の一つとして、世界的に研究開発が加速されつつあるのが、航空機における水素の活用である。

2020 年 9 月には、エアバス社が水素航空機を 2035 年に市場投入すると発表しており、我が国企業においてもこうした動きを受け、水素航空機に関する具体的な取組が始動している。他方で、水素航空機の実現に向けたこのような技術開発と併行して十分に検討しなければならないのが、水素航空機の利用に必要な空港を中心とした周辺インフラや、水素燃料の供給設備における実現可能性である。

現在、航空機に利用されているケロシン燃料は、製油所からタンカーで石油ターミナルへと運搬され、さらに相当距離が離れた空港へと運べるよう、確固とした設備が構築されている。こうした供給網と共存可能な形で、水素燃料を貯蔵、運搬、利用する空港周辺インフラを検討する必要がある。

世界に目を向けると、2021 年 6 月、パリ空港公団が、エアバス、エア・リキードと共同で、空港での液体水素の供給体制を整備するためのエンジニアリング調査を今秋から開始することを発表しており、また、9 月にもエアバス、エア・リキードと空港開発・運営会社のバンシ・エアポートの 3 社が、航空業界における水素利用の促進に向けて提携すると発表している。我が国としても、2021 年 6 月に発表したグリーン成長戦略にて、水素航空機の実現に向けて、必要となる要素技術の開発を推進するとともに、水素燃料の保管、輸送、利用のための空港の検討をすることを明記している。

こうした観点から、水素航空機の導入にあたって、航空機のみならず空港を中心とした周辺インフラにおけるコストおよび課題を検討することで、我が国の水素航空機の研究開発成果における社会実装の確度を上げることを目的とする。

1.2 事業の実施内容

(1) 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施に向けた事前調査

水素航空機の実現に向けたインフラ検討や研究開発の現状を調査するとともに、「令和 3 年度産業経済研究委託事業（水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ調査）報告書」を参考にし、空港の特徴を類型化し、それに沿って、タイムラインも含め空港周辺インフラの整備にあたってのコストおよび課題の精緻化を検討した。

なお、検討内容に関しては、水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施前に、エアライン、空港運営団体、水素インフラ事業者にヒアリング調査の内容を反映させた。

(2) 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施

事前調査をもとに、国内の業界関係者や政府関係者等、関連省庁といった関係機関を集め、水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会を実施した。

検討会では、主に、地理、規模、路線等の特徴に基づく空港の類型化、その類型化に沿ってタイムラインも含め空港周辺インフラのコストおよび課題についての議論を行った。

2 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施

2.1 検討会の概要

・実施体制

本調査では、3章で行った事前調査をもとに、水素航空機関連メーカー、エアライン、水素インフラ事業者、水素販売会社、空港整備に関わる団体、研究機関、関連省庁等の関係機関から構成される、水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会を実施した。

本検討会の実施体制を図 2.1 に、参加組織一覧を表 2.1 に示す。

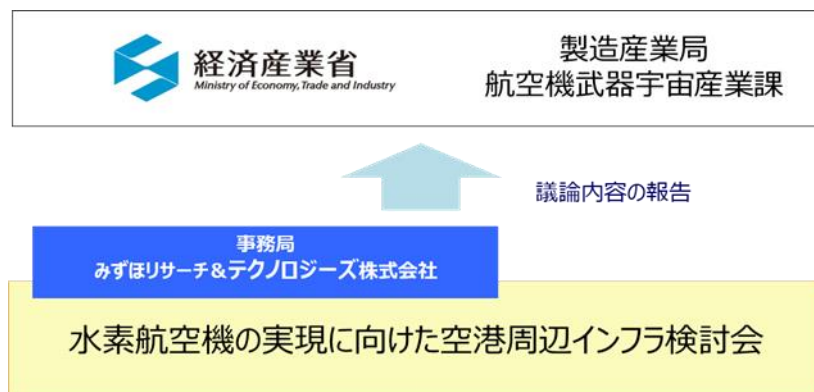


図 2.1 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会・実施体制

表 2.1 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会・参加組織

参加組織（五十音順）
株式会社 IHI
出光興産株式会社
岩谷産業株式会社
株式会社荏原製作所
ENEOS 株式会社
川崎重工業株式会社
コスモ石油マーケティング株式会社
三愛石油株式会社
一般社団法人全国空港給油事業協会
全日本空輸株式会社
定期航空協会
株式会社豊田自動織機
日本航空株式会社
三菱重工業株式会社
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
経済産業省
国土交通省
文部科学省

2.2 開催状況

検討会の開催状況を表 2.2 に示す。

表 2.2 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会・実施状況

回数	開催日	主な議題
第 1 回	2022 年 1 月 31 日	・ 上期検討¹⁾内容の振り返り ・ 空港の類型化について ・ 空港の特徴に沿ったインフラ設備の課題の検討方針
第 2 回	2022 年 2 月 9 日	・ 第 1 回検討会でのご意見 ・ 空港の特徴に沿ったインフラ設備のコスト検討
第 3 回	2022 年 3 月 3 日	・ 第 2 回検討会でのご意見 ・ 空港の特徴に沿ったインフラ整備のコスト検討（続）
第 4 回	2022 年 3 月 16 日	・ 全体総括

¹ 令和 3 年度産業経済研究委託事業（水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ調査）の実施にあたり設置した「水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会」での検討を示す。

3 水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の実施に向けた事前調査

水素航空機の実現に向けたインフラ検討や研究開発の現状を調査し、「令和3年度産業経済研究委託事業（水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ調査）報告書」も踏まえ、水素航空機の導入のタイムラインを整理した。その情報に基づき、空港の特徴（立地、規模等）を区分とした空港の類型化、類型化に沿ったコストの試算、空港周辺インフラの整備にあたっての課題を検討した。

なお、検討内容に関しては、水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会前に実施した、エアライン、空港運営団体、水素インフラ事業者へのヒアリング調査内容を反映させた。

3.1 水素航空機等の研究開発動向

水素航空機の実現に向けたインフラ検討や研究開発の現状に関して文献調査を行い、空港の類型化及びコスト試算を実施する際に必要となる水素航空機の開発状況について整理した。

(1) 水素航空機の開発動向

(a) Clean Sky 2 における調査

欧州における航空分野の共同技術イニシアティブ（JTI）である Clean Sky 2 によると、水素を利用した航空機の開発動向に関しては、小型機から開発が進み、2030 年までに航続距離 500km 程度の航空機、2035 年までに航続距離 2,000km 程度の航空機が導入されることを見込んでいる。水素を利用した航空機の開発動向を図 3.1 に示す。

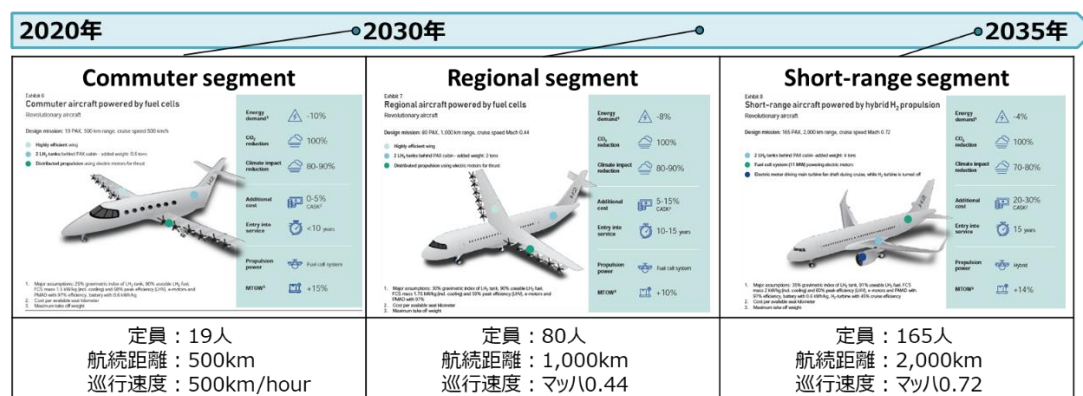


図 3.1 水素を利用した航空機の開発動向²⁾

(b) エアバス社における水素航空機の開発状況

エアバス社では、2020 年 9 月、水素を燃料としたゼロ・エミッションを達成する 3 つの航空機コンセプトを提唱し、2035 年までの実現を目指すと発表した。更に 2022 年 2 月には、A380 を

² 出典：Clean Sky 2 報告書

(https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf, 2022 年 3 月閲覧)
 よりみずほリサーチ&テクノロジーズ作成

試験機（ZEROe demonstrator）として、水素推進システムの実証試験を行うこと発表した。実証試験に用いる試験機の概要を図 3.2 に示す。ゼネラル・エレクトリック社（GE 社）とサフラン社の合弁会社である CFM インターナショナル社が、GE 社のターボファンの燃焼器、燃料システムおよび制御システムを水素燃料向けに改良し、水素燃料を格納するタンクは機体に 4 基搭載する想定となっている。



図 3.2 実証試験に用いる試験機の概要³⁾

(c) 川崎重工業による水素航空機の開発状況

日本国内においても、2021 年 11 月より、川崎重工業が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のグリーンイノベーション基金事業／次世代航空機の開発プロジェクトとして「水素航空機向けコア技術開発」を実施している。事業の概要を図 3.3 に示す。事業では、次世代航空機の実現に必要な機体・エンジン関連のコア技術であるエンジン燃焼器、液化水素燃料貯蔵タンク開発、水素航空機機体構造の検討・開発を実施している。航続距離 2,000km～3,000km の性能を有する機体を想定しており、2030 年に地上での実証試験を計画している。

³ 出典：エアバス社ホームページ（<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-and-cfm-international-to-pioneer-hydrogen-combustion>、2022 年 3 月閲覧）

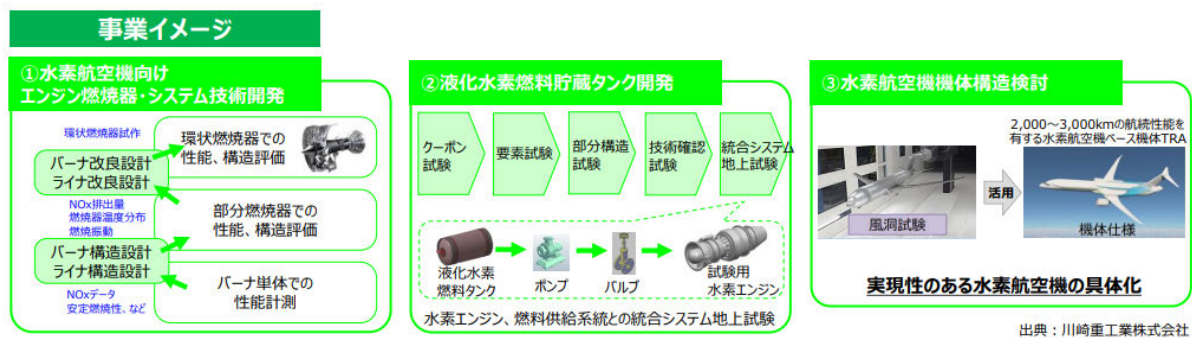


図 3.3 水素航空機向けコア技術開発の概要⁴⁾

(d) Aerospace Technology Institute における水素航空機の開発状況

英国の ATI (Aerospace Technology Institute、航空宇宙技術研究所) は、政府が支援する FlyZero プロジェクトの下、2021 年 12 月に水素航空機のココンセプトを発表している。中型航空機の航続距離は約 9,700km、乗客数は最大 279 人を想定しており、ロンドンからサンフランシスコまでの直行便が可能としている。水素航空機のココンセプトのイメージを図 3.4 に示す。翼幅は 54m、水素燃料に対応するターボファンエンジン 2 基を搭載する。水素燃料は、機体後部のメインタンクと機体前部の 2 基の小型タンクに格納され、翼形状は現行の航空機と比較して薄い形状を想定している。



図 3.4 水素航空機のココンセプト⁵⁾

(e) 水素航空機の開発動向のまとめ

以上まとめたように、欧州、国内において、水素航空機に関わる技術開発の検討が進められており、上期検討結果も踏まえ、国内における水素航空機の導入は、2035 年頃に定員 100 人以下の小型ターボプロップ機から導入が始まり、続いて 2040 年頃に定員 200 人程度のターボファン機の導入がされることを想定シナリオとして、検討を実施することとした。

⁴ 出典：NEDO ホームページ (<https://www.nedo.go.jp/content/100938958.pdf>、2022 年 3 月閲覧)

⁵ 出典：Aerospace Technology Institute ホームページ (<https://www.ati.org.uk/news/one-stop-zero-carbon-emission-global-flight/>、2022 年 3 月閲覧)

(2) 海外における水素航空機関連の空港周辺インフラの検討状況

国際的なハブ空港である、仁川空港（韓国）とチャンギ空港（シンガポール）において水素航空機に関する地上運用を含めた検討が行われることが 2022 年 2 月に発表された。水素航空機の導入を見据えた空港ターミナルの将来像の検討が進むことが期待される。また、ニュージーランド航空、デルタ航空といった航空会社と水素航空機メーカーによる共同研究も進められている。

(a) 韓国での検討状況⁶⁾

韓国では、エアバス社、エア・リキード社、大韓航空、仁川国際空港公社の 4 者が、仁川空港での水素利用に関わる調査を行うことを、2022 年 2 月に発表している。

調査では、民間航空会社による水素航空機の配備を支援するために、韓国国内での空港周辺インフラの開発も対象とするとしている。

(b) シンガポールでの検討状況⁷⁾

シンガポールでは、エアバス社、リンデ社、シンガポール民間航空庁、チャンギ空港グループの 4 者が既存あるいは新設の空港において、水素の輸送、貯蔵、航空機への供給に関わる検討を協働で行うことを、2022 年 2 月に発表している。

(c) ニュージーランドでの検討状況⁸⁾

ニュージーランドでは、2021 年 9 月、ニュージーランド航空とエアバス社が水素航空機の運航の可能性を図るための共同研究に協力する覚書を締結している。ニュージーランド航空は、水素航空機が同社のネットワーク、運用、インフラ設備に与える影響を分析する。一方、エアバス社は、ニュージーランド航空の脱炭素化ロードマップを支援するために、水素航空機に期待される性能、水素航空機特有の地上業務について情報共有を進める。

(d) 米国での検討状況⁹⁾

米国のデルタ航空とエアバス社は、水素航空機とその運用に必要なエコシステムの開発を加速させる目的で、共同研究を行うことを発表した。持続可能な技術を拡大、発展させる「Flight to Net ZeroSM（フライト・トゥ・ネットゼロ）」計画の一環として、水素航空機とその運用に必要なエコシステムの研究開発に関して、デルタ航空は米国の航空会社として初めてエアバス社と協業するための覚書に調印した。

⁶ 出典：エアバス社ホームページ（<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-air-liquide-korean-air-and-incheon-international-airport>、2022 年 3 月閲覧）

⁷ 出典：エアバス社ホームページ（<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-signs-agreement-to-study-hydrogen-hub-in-singapore>、2022 年 3 月閲覧）

⁸ 出典：エアバス社ホームページ（<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-09-airbus-and-air-new-zealand-to-study-potential-for-hydrogen-powered-aircraft>、2022 年 3 月閲覧）

⁹ 出典：デルタ航空ホームページ（<https://news.delta.com/decarbonized-future-flight-delta-and-airbus-collaborate-pull-forward-future-hydrogen-fuel-JP>、2022 年 3 月閲覧）

3.2 空港の類型化

(1) 類型化の方針

水素航空機に対応した空港周辺インフラの整備の実現に向けた課題、タイムラインを検討するにあたり、具体的な空港周辺インフラの想定を設定するために、空港の特徴（立地、規模等）から空港の類型化（分類）を実施した。

類型化の主な指標は、空港の立地と規模とした。この2つを指標とした理由は、空港の立地によって、空港ごとで燃料の受け入れ方法が異なってくること、空港の規模や離発着する航空機のサイズが燃料貯蔵タンクをはじめとする空港内のインフラの規模に影響を与えると想定した点にある。

類型化の指標と検討項目との関係性を図 3.5 に示す。

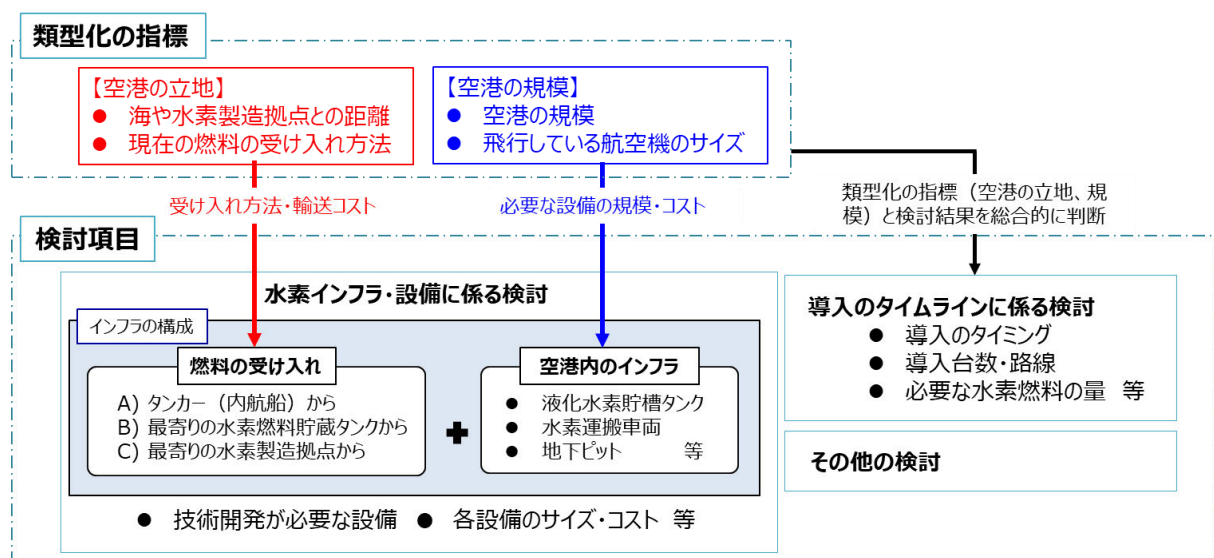


図 3.5 類型化の指標と検討項目の関係性

空港の類型化は、①指標に基づいた空港の情報の整理、②整理した情報に基づいた空港の類型化の順に実施した。以降に各指標の詳細を示す。

(2) 空港情報の整理方針

(a) 空港の立地

液化水素運搬船及び国内の製造拠点から水素燃料を受け入れを想定し、空港と海や港との距離に基づき、空港の立地を3つに分類した。以降に分類の概要を示す。

A) タンカー（内航船）から燃料を供給している空港

- ・ 液化水素運搬船⇒空港内の液化水素貯蔵タンク⇒水素航空機等の流れでの供給を想定

【ジェット燃料をタンカーから供給する空港】羽田、中部国際、関西国際、長崎、大分、那覇

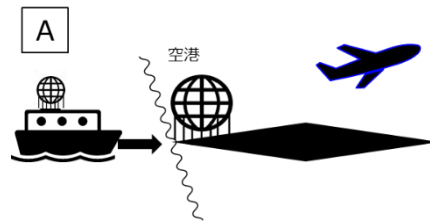


図 3.6 水素インフラの想定（A：タンカー（内航船）から燃料を供給している空港）

B) 海岸に近い空港

- ・ タンカーからの燃料供給の可能性もあり得る
- ・ 液化水素運搬船⇒港にある水素燃料貯蔵基地⇒ローリー（パイプライン）⇒空港内の液化水素貯蔵タンク⇒水素航空機等の流れでの供給を想定

【想定される空港】A 以外の海に面している空港、海から 500m 以内の空港

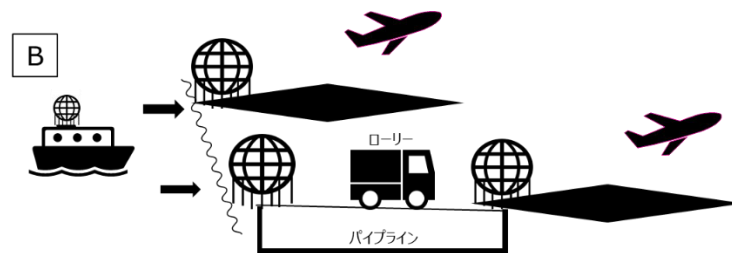


図 3.7 水素インフラの想定（B：海岸に近い空港）

C) 海岸から遠い空港

- ・ 港にある水素燃料貯蔵基地(または国内の水素製造拠点)⇒ローリー⇒空港内の液化水素貯蔵タンク⇒水素航空機等の流れでの供給を想定

【想定される空港】A、B に該当しない空港

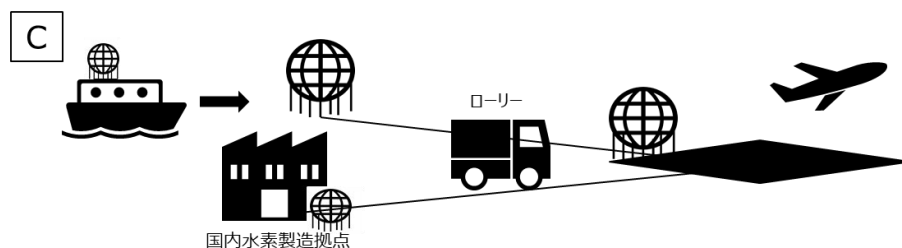


図 3.8 水素インフラの想定（C：海岸から遠い空港）

(b) 空港の規模

水素航空機の導入タイムライン及び必要となる設備サイズを検討するために、国内における空港において機体サイズごとの出発便数の分析を実施した。出発便数のデータは、2019年秋季の日本航空、全日本空輸の時刻表を利用した。

出発便数の集計は、表 3.1 に示す機体サイズの区分にしたがい行った。

表 3.1 機体サイズ区分

機体サイズ区分	座席数	代表的な機種	水素航空機 導入時期
大型ジェット機	300 席以上	ボーイング 777 シリーズ、ボーイング 787 シリーズ、エアバス A350	未定
中型ジェット機	300～200席程度	ボーイング 767 シリーズ	未定
小型ジェット機	200～100席程度	エアバス A320、エアバス A321、 ボーイング 737 シリーズ	導入中期
100 人以下の小型機	100 席以下	エンブラエル 190、エンブラエル 170、 ATR72-600、ATR42-60、SAAB340B、 ボルバンディア DHC8-Q400	導入初期

(c) その他の調査項目

公開情報に基づき、空港の分類に関わる情報を収集した。情報収集した調査項目を表 3.2 に示す。

表 3.2 その他調査項目

項目	概要	情報の出所
着陸回数	各空港における年間の国内線の着陸回数	国土交通省・空港管理状況調書 (コロナウイルスの影響を考慮し、2019 年のデータを利用)
航空燃料供給量	各空港における年間の空港燃料供給量	
主要港湾との距離	各空港における主要港湾と主要港(国際戦略港湾、国際拠点港湾、重要港湾の一部)からの距離 <分類> 【島】離島 【海岸遠】海岸から 500m 以上(離島以外) 【海岸近】海岸から 500m 以内 【タンカー】タンカーから燃料を供給 【海】海岸に面している空港	地理院地図 グーグルマップ
エプロン	各空港が保有するエプロン(駐機場)のサイズ(大型・中型・小型ジェット機/小型機/プロペラ機/その他)と数	航空局ホームページ 各空港供用規程
滑走路	各空港が保有する滑走路の数と長さ	

(3) 空港情報の整理結果

以上、説明した整理方針に基づき、まず空港の立地に関わる 3 区分(タンカーから燃料を供給している空港/海岸に近い空港/海岸から遠い空港)に分類した後に、各空港の機体サイズ別出発便数(1 日当たり)等の基本情報を整理した。

整理結果を表 3.3 に示す。

表 3.3 空港情報の整理結果

A) タンカー（内航船）から燃料を供給している空港

空港	機体サイズごとの一日の出発便数			
	大型ジェット機	中型ジェット機	小型ジェット機	100 人以下の小型機
東京国際空港	—	—	—	—
中部国際空港	2	1	36	22
関西国際空港	2	1	24	0
大分空港	0	0	14	8
長崎空港	4	3	13	16
那覇空港	20	11	71	16

B) 海岸に近い空港

空港	機体サイズごとの一日の出発便数			
	大型ジェット機	中型ジェット機	小型ジェット機	100 人以下の小型機
函館空港	2	5	4	10
稚内空港	0	2	2	4
紋別空港	0	0	1	0
庄内空港	0	1	3	0
仙台空港	0	2	6	37
新潟空港	0	0	4	19
南紀白浜空港	0	0	0	3
神戸空港	1	1	29	0
岩国空港	0	0	1	0
美保空港	0	3	3	0
鳥取空港	0	0	5	0
山口宇部空港	0	3	7	0
松山空港	6	0	9	18
徳島空港	0	7	4	2
高知空港	0	0	11	10
北九州空港	0	0	5	1
宮崎空港	0	3	20	20
佐賀空港	0	0	5	0

C) 海岸から遠い空港（比較的海に近い空港）

空港	機体サイズごとの一日の出発便数			
	大型ジェット機	中型ジェット機	小型ジェット機	100 人以下の小型機
女満別空港	0	3	3	6
丘珠空港	0	0	0	16
新千歳空港	30	10	62	45
青森空港	0	0	6	11
富山空港	0	0	4	0
名古屋空港	0	0	4	16
大阪国際空港	—	—	—	—
高松空港	2	5	8	0
福岡空港	30	7	29	73

C) 海岸から遠い空港（内陸の空港 一部抜粋）

空港	機体サイズごとの一日の出発便数			
	大型ジェット機	中型ジェット機	小型ジェット機	100 人以下の小型機
旭川空港	0	7	1	0
帯広空港	0	3	4	0
中標津空港	0	1	0	3
花巻空港	0	0	0	8
福島空港	0	0	3	2
大館能代空港	0	0	2	0
秋田空港	0	0	9	12
山形空港	0	0	0	8
松本空港	0	0	0	4
静岡空港	0	0	2	9
広島空港	4	8	9	1
岡山空港	2	2	7	0
熊本空港	1	8	15	14
鹿児島空港	0	8	19	42

(4) 空港の類型化検討

整理した空港の情報をもとに、空港の類型化を検討し、空港の立地区分と空港の規模区分（主に、発着する航空機サイズ）の組み合わせにより、空港を類型化することとした。

空港の立地区分と規模区分の概要を表 3.4、空港の類型化区分を表 3.5 に示す。

表 3.4 類型化検討で利用する区分の概要

区分	区分名	概要
空港の立地区分		
A	タンカー（内航船）から燃料を供給している空港	・ 空港に水素を直接運搬することが可能と想定される空港
B	海岸から近い空港	・ A 以外の空港で、海岸に近接している空港
C	海岸から遠い空港	・ A、B のいずれにも該当しない空港
空港の規模区分		
1	小規模空港	・ 小型ジェット機、100 人以下の航空機のみが発着している空港 ・ （水素航空機導入初期（2035 年）に、想定される水素航空機サイズと同等のサイズの航空機が発着が主な空港）
2	中規模空港	・ 中型ジェット機、小型ジェット機が主に発着している空港（一部では大型ジェット機の運航もあり） ・ （水素航空機導入中期（2040 年～）に、想定される水素航空機サイズと同等のサイズの航空機が発着がある空港） ・ 年間の航空燃料供給量が 20 万 kL 以下
3	大規模空港	・ 大型ジェット機、中型ジェット機が主に発着している空港 ・ 年間の航空燃料供給量が 20 万 kL 以上

表 3.5 空港の類型化区分

立地区分	規模区分	概要
A	1	タンカーから燃料を供給している小規模空港
	2	タンカーから燃料を供給している中規模空港
	3	タンカーから燃料を供給している大規模空港
B	1	海岸に近い小規模空港
	2	海岸に近い中規模空港
	3	海岸に近い大規模空港
C	1	海岸から遠い小規模空港
	2	海岸から遠い中規模空港
	3	海岸から遠い大規模空港

(5) コスト検討を実施する類型化空港の選定

空港の類型化結果に基づき、空港周辺インフラのコスト試算を実施する類型化空港を検討した。選定した類型化空港及びその空港の特徴を表 3.6 に示す。

なお、選定に際しては以下の項目を考慮した。

- 水素航空機導入初期（2035 年）に想定される、100 席以下の小型ターボプロップ機の就航路線を有する空港
- 水素航空機導入中期（2040 年～）に想定される、120 席から 200 席程度の小型ジェット機の就航路線を有する空港
- 空港の規模（大規模、中規模、小規模のいずれの規模の空港も検討ができるように考慮）
- 空港への燃料の受け入れ方法（タンカー、ローリー共に検討ができるように考慮）
- 水素の利活用のしやすさ（既存の水素製造拠点、今後想定される水素製造拠点）

表 3.6 選定した類型化空港とその特徴

区分	類型化空港	類型化空港の特徴
A-3	タンカーから燃料を供給している大規模空港	・ターボプロップ機（ボンバルディア DHC8-Q400 等）の就航がある ・カーボンニュートラルポートに選定された港が近くにある ・（水素航空機向けではないものの）水素製造設備の設置計画がある
B-2	海岸から近い中規模空港	・ターボプロップ機（ボンバルディア DHC8-Q400 等）の就航がある ・海岸から近いいためタンカーからの給油の可否も視野に入れての検討が可能である ・港－空港間をパイプラインで輸送する場合は空港内で液化が必要となる
C-1	海岸から遠い小規模空港	・小型ジェット機の就航がある（エアバス社が開発予定の水素航空機（ターボプロップ機）より、さらに小型のターボプロップ機の就航がある） ・再生可能エネルギー（風力）を利用した水素製造の可能性がある ・カーボンニュートラルポートに選定された港が近くにある
C-2	海岸から遠い中規模空港	・ターボプロップ機（ATR72 等）の就航がある ・現状、周囲に水素貯蔵拠点、水素燃料製造拠点はなないため、新規設備が必要となる（現在の国内水素製造拠点：千葉県市原市、山口県周南市、大阪府堺市）
—	その他	・最低限の水素インフラでの対応を想定する ・既存の貯蔵拠点がある場合は、ローリーで必要量の水素を供給することが可能と想定する

3.3 コスト試算

本節では、類型化に沿って水素航空機の導入及び運用に係る空港周辺インフラのコスト試算を実施した。3.3.1 ではコスト試算を実施する上での前提を、3.3.2 では水素航空機の導入シナリオ、設備の導入規模についてまとめている。さらには、3.3.2 で示したシナリオに沿い、3.3.3、3.3.4 においてコスト試算の結果を示している。

試算にあたり、水素航空機の実現に向けた空港周辺インフラ検討会の参加組織である、エアライン、水素インフラ事業者、水素航空機関連メーカー等の関係機関に対して、事前にヒアリングを実施して、コスト試算の前提となる設定に反映を行っている。具体的には、以下の項目についてヒアリングを実施した。

表 3.7 コスト試算に関わるヒアリング概要

ヒアリング先	主なヒアリング内容
エアライン	航空機の運用、水素インフラの想定、設備のサイズ
水素インフラ事業者	輸送設備、コスト試算の前提、液化水素貯蔵タンク容量の想定
水素航空機関連メーカー	水素航空機の想定
空港事業に関わる団体	国内空港における給油状況

3.3.1 コスト試算の前提

(1) 水素航空機の想定

コスト試算の実施にあたり、導入初期及び導入中期における水素航空機の仕様（航続距離、燃料タンク容量等）を想定するために、現在就航している航空機燃料を水素燃料に置き換えたと仮定した際のタンク容量や重量を算出した。算出した結果を表 3.8 に示す。

欧州の検討状況より、導入初期（2035 年）には 100 席程度のターボプロップ機（小型機）、導入中期（2040 年～）には 120 席から 200 席程度の小型のターボファン機が開発されることを想定し、現在就航している機種の中から同サイズの機種を選定した。

水素航空機の燃料タンク（液水タンク）の容量は、同一発熱量当たりの体積はケロシン燃料の 4 倍となることを利用して算出した。

表 3.8 水素航空機の想定

想定時期	機種	航続距離	ケロシンタンク(kL)	液水タンクの容量(m ³)	液水タンクの容量(トン)	空港内での水素運搬車両
導入初期	ATR72 ボンバルディア DHC8-Q400	約1,500km	6.4	25.5	1.8	2台のローリー
導入中期 本格期	B737-800	約3,900km	26	104.0	7.3	5台のローリー
その他	B767-300	約3,400km	46	183.3	12.9	中型と大型の間
その他	B777	約14,800km	171	681.3	48.1	大型機

※ 同一発熱量当たりの燃料体積はケロシンの4倍となることから液水タンクの容量を推定

※ 水素燃料に対応したレフューラーが現状は存在しないため、ローリー（1.5トン/台）に給水素ポンプをつけて対応することを仮定

水素の場合、同一発熱量を得るためには、ケロシン燃料の4倍の体積を必要とするため、水素航空機の燃料タンクは大容量となる。燃料タンクの大容量化に伴い、機体サイズは大型化し、機体重量も増加するため、水素航空機の航続距離は現行機よりも短くなることが想定される。

以上の想定を踏まえて、導入初期及び導入中期の水素航空機の想定を表 3.9 のように仮定した。

表 3.9 コスト試算に用いる水素航空機の想定

想定時期	想定機種	想定座席数	航続距離	液水タンクの容量(m ³)	液水タンクの容量(トン)	空港内での水素運搬車両
導入初期	ターボプロップ機	100席程度	1,000km	21.2	1.5	1台のローリー
導入中期	ターボファン機	120～200席	2,000km	42.4	3.0	2台のローリー

(2) コスト試算で利用する数値に係る前提

コスト試算で用いた数値及び考え方について、表 3.10 に整理する。

表 3.10 コスト試算で用いた数値及び考え方

項目	コスト	量	備考・引用元
製造 ¹⁾ (海外製造⇒国内の貯蔵拠点までの運搬)	30円/Nm ³ (2030年)	30万吨/年 (2030年)	・海外での製造を想定、国内の一次基地までの運搬(荷揚は含まず)のコスト
荷揚 ²⁾	8円/Nm ³ (2030年)		・海外製造拠点⇒国内の貯蔵拠点に荷揚する際のコスト ・液化水素の受入、タンクでの貯蔵、輸送・需要への払い出し、荷役設備、貯蔵タンク(80,000m ³ ×4)、気化器、付帯設備の価格を含む ・一次基地が空港内にある場合は荷揚は考慮しない(タンクにコストを含むため)
液化水素貯蔵タンク(一次・二次基地／空港内)	参考1にて記載		
内航船 ²⁾ (荷揚基地⇒港(二次基地))	円/Nm ³ =0.005X+0.5 (X:輸送距離(km)) 約1.0円/Nm ³ (100km) 約2.5円/Nm ³ (400km) 約3.5円/Nm ³ (600km)		・コストには設備費、修繕費、船用品費、保険、船主費用、金利、人件費、燃料費、ポートチャージ、運航、店費等を含む
輸送(ローリー) ²⁾	円/Nm ³ =0.03X+1.5 (X:輸送距離(km)) 約2.5円/Nm ³ (30km) 約3.0円/Nm ³ (50km) 約4.5円/Nm ³ (100km) 約6.0円/Nm ³ (150km)	ローリー 約1.5トン/台	・コストには設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費を含む ・詳細な考え方は参考2に記載
レフューラー ^{2,3)} (ローリー(空港内))	本体代:1億円 メンテナンス関連費 ・700万円/年 レフューラーの年間 当たりの費用 1,700万円/年 (使用年数は10年と仮定)	ローリー 約1.5トン/台	・価格は5,000万円(本体)+5,000万円(レフューラーへの改造費、みずほリサーチ&テクノロジーズ仮定)とする ・レフューラーの改造費にポンプ代金を含む ・使用年数は10年(みずほリサーチ&テクノロジーズ仮定) ・設備の初期導入費用の7%/年とする ・メンテナンス関連費には固定資産税(1.5%)、保険料(1.5%)、修繕費(3%)、製造管理費(1%)を含む ・給油作業は従来的人员での実施を想定することも想定 ・詳細な考え方は参考2に記載
【引用元】 1) 水素・燃料電池戦略ロードマップ(水素・燃料電池戦略協議会作成) 2) エネルギーキャリアシステム調査・研究・エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析 3) 平井ら, “水素タウンを考える-社会インフラとしてのエネルギーシステム-” (http://eneken.ieej.or.jp/data/7302.pdf、2022年3月閲覧)			

<参考1：液化水素貯蔵タンクのコストの考え方>

国内における荷揚げから配送まで含めて、水素キャリアの輸送・貯蔵を検討している文献には、「エネルギーキャリアシステム調査・研究・エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析」¹⁰⁾がある。液化水素貯蔵タンク(荷揚を含む)に関わるコストは、同文献¹⁰⁾での数値や考え方に基づき算出した。液化水素貯蔵タンクに関わるコスト算定の前提を以降に整理する。

液化水素貯蔵タンクに関わるコストとしては、設備費(初期導入費)に加え、メンテナンス関連費と人件費を考慮した。詳細は、表 3.12 に示す。参考文献¹⁰⁾では、液化水素貯蔵タンクの初期導入費は12,500m³×2基のタンクで283.2億円と見積もられている。12,500m³×2基のタンクの初期導入費(283.2億円)の内訳を表 3.12 に示す。なお、液化水素貯蔵タンクの初期導入費は、

液化水素貯蔵タンク本体のコストに加えて付帯設備等を含むコストである。

本コスト試算では、液化水素貯蔵タンクはメンテナンス時の対応、冗長性を考慮し、2基設置することを想定した。12,500m³×2基のタンクの初期導入費をベースに、類型化空港で想定されるタンク容量に対してスケールファクター（0.67）を考慮して、液化水素貯蔵タンクに関わるコストを算出した。

本コスト試算で利用する液化水素貯蔵タンクの容量に対してのコスト算出結果を表 3.13 に示す。

表 3.11 液化水素貯蔵タンクのコストの考え方

項目	算出方法
液化水素貯蔵タンクの初期導入費用	・12,500 m³のタンク2基(合計25,000m³)で283.2億円の試算をベースとする。 ・スケールファクター0.67とする。 ・初期導入費用には付帯設備(受入設備、BOG設備、払出設備、ローリー出荷ポンプ等)のコストも含む。
メンテナンス関連費	・設備の初期導入費用の7%/年とする。 ・メンテナンス関連費に固定資産税(1.5%)、保険料(1.5%)、修繕費(3%)、製造管理費(1%)を含む。
人件費	・1人あたり700万円/年に加えて、一般管理費として20%を考慮する。 ・必要となる人数は貯蔵タンクサイズによりみずほリサーチ&テクノロジーズが仮定した。空港内の貯蔵タンクであれば、空港内の人員で対応可能であることを考慮して、人員数を設定。
タンクの使用年数	・30年

表 3.12 液化水素二次基地の仕様¹⁰⁾

設備名	仕様等	基数	設備費(億円)	備考
受入設備			12.0	
受入ローディングアーム	6B	1		
戻りガスアーム	4B	1		
戻りガスブローア		2		
貯蔵設備				
12,500m ³ 貯蔵タンク	金属二重殻式	2	227.0	容量スライド計算
高圧貯槽		-		必要なし
ブリージングタンク		-		必要なし
BOG 設備			7.5	容量スライド計算
BOG コンプレッサー		2		
BOG コンデンサー		2		
BOG レシーバー		1		
払出設備				
払出ポンプ	150m ³ /h*6.0MPa	2	8.0	
払出ヒーター		-		ガス払出無し

¹⁰⁾ 出典：平成 26 年度 - 平成 27 年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 エネルギーキャリアシステム調査・研究・エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO））

設備名	仕様等	基数	設備費(億円)	備考
内航船出荷ポンプ		-		内航船出荷無し
内航船出荷ローディングアーム（液）		-		内航船出荷無し
内航船出荷ローディングアーム（ガス）		-		内航船出荷無し
ローリー出荷ポンプ	340m ³ /h*0.15MPa	2	2.6	
ローリー出荷ローディングアーム（液）	2B	6	18.0	ローディング設備として、1台3億円を計上
ローリー出荷ローディングアーム（ガス）	1B	6		
トラックスケール	30 トン	6	0.9	1.5 千万円/台
防消火設備			7.2	
防消火ポンプ				
散水、消火設備				
消防車				
ユーティリティ設備				液化水素で出荷のため必要なし
海水ポンプ	-	-		
気化器		-		
合計			283.2	

表 3.13 液化水素貯蔵タンクのコスト算出結果

サイズ(m ³)	サイズ比	初期導入費用 (億円)	メンテナンス費用 30年分（億円）	人員数 (人)	人件費 30年分（億円）	30年分の合計費用 (億円)	1年間当たりの 費用(億円)
25,000 (12,500×2基)	1	283.2					
560 (280×2基)	0.02	22.2	46.66	1	2.52	71.4	2.38
1,540 (770×2基)	0.06	43.8	91.90	3	7.56	143.2	4.77
6,020 (3,010×2基)	0.24	109.1	229.10	4	10.08	348.3	11.61
7,560 (3,780×2基)	0.44	127.1	366.87	4	10.08	404.0	13.47

＜参考 2：内航船・ローリーの輸送の考え方＞

内航船及びローリーでの輸送コストについては、「エネルギーキャリアシステム調査・研究・エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析」¹⁰⁾における考え方を参考にした。

内航船及びローリーの輸送コストの検討範囲及び考え方を表 3.14 に示す。表中に示しているように、輸送コストには設備費（内航船、ローリー）以外に、人件費や修繕費等が含まれる。

参考文献¹⁰⁾における輸送距離に応じた輸送コストの算出結果を図 3.9 に示す。本コスト試算では、図 3.9 を利用して輸送距離に応じた輸送コストを算出した。

表 3.14 内航船及びローリーの検討範囲・考え方¹¹⁾

機種	考え方	検討範囲のコスト	共通条件
内航船	陸揚げ基地から二次基地の輸送費用を検討	設備費、修繕費、船用品費、保険、船主費用、金利、人件費、燃料費、ポートチャージ、運航店費等	輸送する水素量：50 万トン/年 液化水素：2500kL 級液化水素 輸送内航船 内航船の価格は 12.33 億円/船 (LNG 船をもとに船型を想定)
ローリー	一台のローリーが設定条件において 1 年で輸送するキャリア量から、ローリーの台数、付随する費用を積算	設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費	輸送する水素量：50 万トン/年 20kL 級のローリーから水素ステーションへ移送（留置なし） ローリーの価格は 5,000 万円/台 (容量は 20kL)

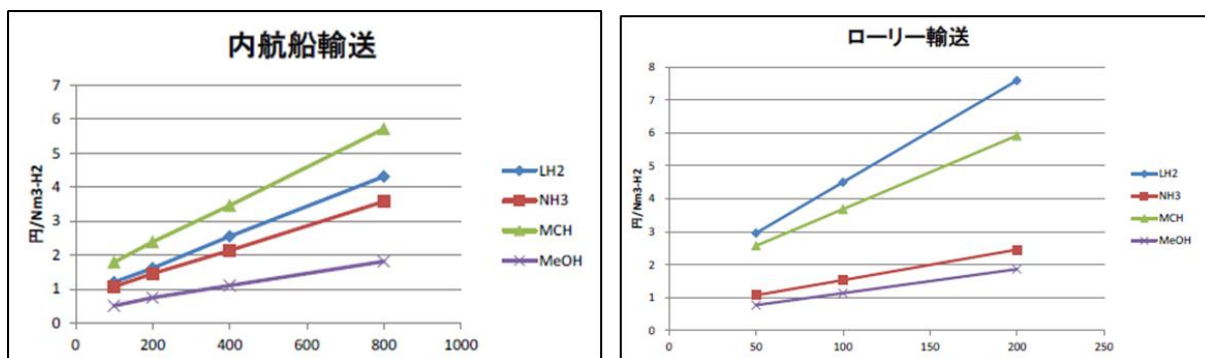


図 3.9 内航船及びローリーにおける輸送距離に応じたコスト¹⁰⁾

¹¹⁾ 平成 26 年度 - 平成 27 年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 エネルギーキャリアシステム調査・研究・エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）よりみずほりサーチ&テクノロジーズ作成

3.3.2 コスト試算の方針

3.2 において選定した類型化に対して、水素航空機の導入初期と導入中期における空港周辺インフラのコスト試算を実施した。コスト試算の方針を以下に示す。

(1) 類型化毎のインフラ設備の想定

3.2 において選定した類型化に対して、空港の立地、規模や特徴に沿って空港周辺インフラ設備の想定を実施した。各類型化空港の空港周辺インフラの想定を表 3.15 と図 3.10 に示す。

なお、コスト試算を実施する範囲は、水素燃料のコストには海外から一次基地までの運搬が含まれていること、供用の貯蔵基地を利用する場合は、荷揚げコストを考慮して、貯蔵基地に関する設備費は考慮しないことを踏まえた上で、範囲設定を行った。

表 3.15 各類型化空港の空港周辺インフラの想定

No.	類型化空港	空港周辺インフラ設備に関する想定
1	C-1 海岸から遠い小規模 空港	・ 海岸から離れているため最寄りの港へ荷揚げされた水素燃料をローリーで空港内の液化水素貯蔵タンクまで運ぶことを想定 ・ 一次基地として、カーボンニュートラルポートに選定された港を活用することを想定
2	A-3 タンカーから燃料を 供給している大規模 空港	・ ジェット燃料を内航船で受け入れていることから、水素燃料についても空港内に液化水素貯蔵タンクを作り、運搬船から直接燃料を荷下ろしすることを想定
3	C-2 海岸から遠い中規模 空港	・ 内陸にあり、近くに液体水素貯蔵設備及び国内製造拠点がないことを想定して、海外で製造された液化水素を国内の液化水素貯蔵基地（一次基地）まで輸送、荷揚げをした後、内航船により空港最寄りの港（二次基地）まで輸送して、さらにローリーで空港内の液化水素貯蔵タンクへ運搬することを想定
4	B-2 海岸から近い中規模 空港	・ 海岸からの距離が近いことから、空港に直接受け入れることはないものの、一次基地から内航船で水素運搬して、空港内の液化水素貯蔵タンクへ水素燃料を供給することを想定

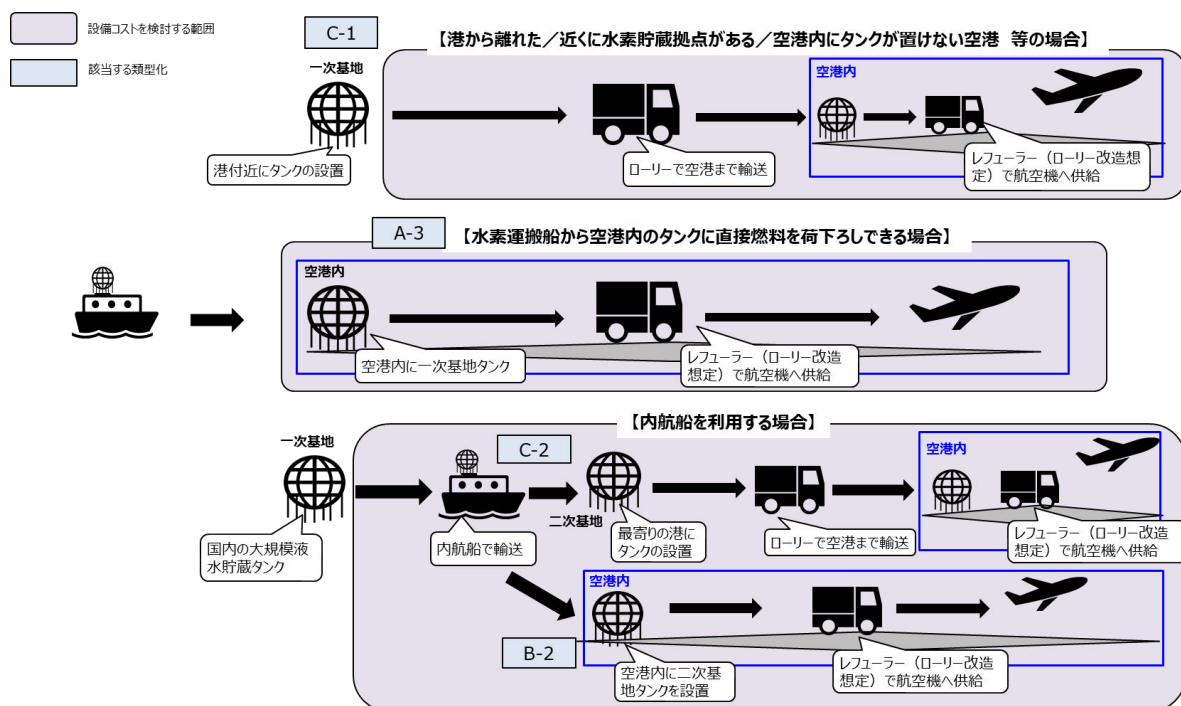


図 3.10 各類型化における水素インフラの想定

(2) 水素航空機の導入数

本コスト試算における水素航空機の想定を表 3.16 に、導入初期及び導入中期における水素航空機の導入数の想定を表 3.17 に示す。表 3.17 には、1 空港あたりで必要となる水素燃料の量も示す。必要となる水素量は、水素燃料の給油は飛行の都度実施することを仮定して総飛行距離の半分の量を想定した。

表 3.16 水素航空機の想定

機種	想定座席数	航続距離	液化水素燃料 タンクの容量 (m^3)	液化水素燃料 タンクの容量 (トン)	1 日あたり の就航距離
ターボプロップ機	100 席程度	1,000km	21.2	1.5	3,000km
ターボファン機	120～200 席	2,000km	42.4	3.0	6,000km

表 3.17 水素航空機の導入機数の想定（1 空港あたり）

時期	ターボプロップ機	ターボファン機	水素必要量 (/日)	水素必要量 (/週)	水素必要量 (/年)
導入初期	1 機	0 機	2.25 トン (31.72m ³)	15.75 トン (222.07m ³)	821.25 トン (11,579m ³)
導入中期	3 機	1 機	11.25 トン (158.62m ³)	78.75 トン (1,110m ³)	4,106 トン (57,898m ³)
・ターボプロップ機（航続距離：1,000km、液化水素燃料タンクの容量：1.5 トン）で、1 日あたり 3,000km の就航を想定 ・ターボファン機（航続距離：2,000km、液化水素燃料タンクの容量：3.0 トン）で、1 日あたり 6,000km の就航を想定 ・水素燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では 1 日あたりのターボプロップ機（1 機）の総飛行距離の半分である 1,500km 分の水素燃料を想定 ・水素航空機の導入中期では 1 日あたりのターボプロップ機（3 機）とターボファン機（1 機）の総飛行距離の半分（ターボプロップ機：1,500km 分×3 機分、ターボファン機：3,000km×1 機分）の水素燃料を想定 ・BOG（ボイルオフガス）による水素量の減少は考慮していない点に留意					

(3) 設備の導入規模

Small スタート、Large スタートの 2 種類のシナリオを想定して、設備の導入規模の検討に係るコスト試算を実施した。表 3.18 に、Small スタート、Large スタートの概要を示す。

表 3.18 設備の導入規模の想定

項目	内容
Small スタート	・導入初期の導入に耐えうる最低限の設備を整備 ・導入中期では（空港で利用する水素量の増加に対応するために）液化水素貯蔵タンク、レフューラーの追加設備が必要
Large スタート	・導入初期の段階から導入中期の導入拡大に耐えうる設備を整備 ・導入中期の追加設備は（空港で利用する水素量の増加に対応する）レフューラーのみ

(4) 想定シナリオ

コスト試算は、導入初期－１、導入初期－２、導入中期の３つのシナリオに対して実施した。各シナリオの概要を表 3.19 に示す。

表 3.19 シナリオの想定

シナリオ名		概要
3.3.3	導入初期－１	・全類型化（A-3、B-2、C-1、C-2）に対して、Small スタート を想定した場合の導入初期コストを試算
3.3.4	導入初期－２	・大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して初期に Small ス タート、Large スタートを想定した場合の導入初期コストを 試算
3.3.4	導入中期	・大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して初期に Small ス タート、Large スタートを想定した場合の導入中期コストを 試算

3.3.3 水素航空機導入初期のコスト試算（導入初期－１）

導入初期－１のコスト試算では、Small スタートを想定した場合のコスト試算を実施した。各類型化における試算内容を以下に示す。

(1) 導入初期－１（C-2：海岸から遠い中規模空港）

C-2 は内陸にあり、かつ、空港の近くに液体水素貯蔵設備及び国内製造拠点がなくことを想定したため、類型化の中で最も必要とする設備の数が多い空港である。導入のシナリオとしては、海外で製造した液化水素を国内の液化水素貯蔵基地（一次基地）まで輸送、荷揚げをし、内航船により C-2 の最寄りの港へと輸送した後、ローリーにより空港内まで輸送することを想定した。一次基地は供用で利用することを想定し、内航船での運搬以降を検討範囲とする。以降に C-2 における導入・設備シナリオ及びコスト試算について整理する。

【基本情報：導入・設備シナリオ】

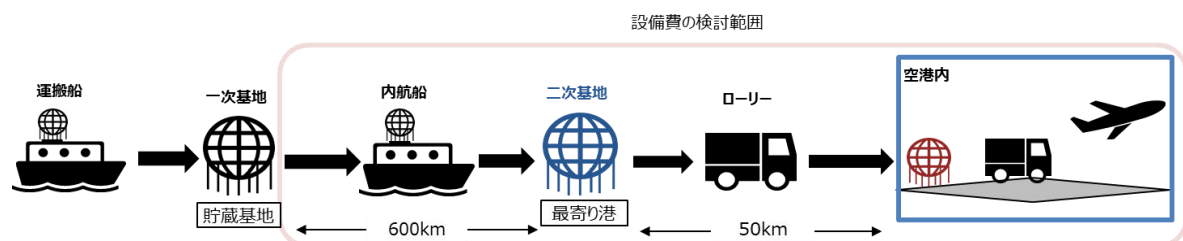


図 3.11 水素インフラの想定（C-2）

表 3.20 導入シナリオ（導入初期－１：C-2）

項目	内容
一次基地から主要港までの距離	約600km
最寄りの主要港から空港までの距離	約50km
利用する水素	海外製造の水素
空港への燃料の受け入れ方法	液化水素運搬船⇒一次基地(規模の大きな液化水素貯蔵基地)⇒内航船で二次基地(最寄りの主要港)⇒ローリーで空港内の貯蔵タンク
導入を想定する水素航空機と台数	ターボプロップ機 1機（液化水素タンクの容量 1.5トン）
就航内容	1機あたりの総飛行距離約3,000km/日、複数往復
1日に必要となる水素量	2.25トン/日（燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では1日あたりの総飛行距離の半分である1,500km分の水素燃料を想定）

表 3.21 設備のシナリオ（導入初期－１：C-2）

設備名	詳細	備考
液化水素貯蔵タンク（一次基地）	・巨大な水素貯蔵基地（他用途の利用も想定）	荷揚コストが必要となる
内航船	・一次基地から二次基地（片道600km）まで燃料を運搬	片道600km
液化水素貯蔵タンク（二次基地）	・空港で利用する20日分の水素燃料を貯蔵できるサイズを想定 【タンクサイズ】(20日×2.25トン)×1.20＝約55トン	容量 約770m ³ （約55トン） （冗長性を考慮し）2基
液化水素貯蔵タンク（空港内）	・空港で利用する1週間分の水素燃料を貯蔵できるサイズを想定 【タンクサイズ】(7日×2.25トン)×1.20＝約20トン	容量 約280m ³ （約20トン） （冗長性を考慮し）2基
ローリー（二次基地⇒空港）	・二次基地から空港内への水素の輸送で利用することを想定	片道50km
レフューラー（ローリー・空港内）	・空港内のタンクから航空機までの輸送及び給油を想定 ・レフューラーの改造費には、水素航空機の液化水素タンクへの注入ポンプ代も含む	（冗長性を考慮し）2台導入
＜設備の備考＞ ・タンク内に入れることができる水素量は液化水素貯蔵タンク容量の80%であることを考慮した ・レフューラーの改造費には、水素航空機の液化水素タンクへの注入ポンプ代も含めている		

表 3.22 必要な水素量（導入初期－１：C-2）

	必要量 （/日）	必要量 （/週）	必要量 （/年）	備考（算出根拠）
水素重量	2.25トン	15.75トン	821.25トン	・ターボプロップ機（液水タンクの容量 1.5トン）を1機導入 ・1機あたり3,000km/日の就航を想定、水素航空機の導入初期では片道分2.25トンの水素を給油することを仮定 ・BOG量は考慮していない値であることに留意
水素体積	31.72m ³	222.07m ³	11,579m ³	

【シナリオに基づいたコスト試算】

表 3.23 コスト試算（導入初期－１：C-2）

項目	コスト/年	備考（算出根拠）
水素コスト（調達）	3.49億円	2030年の水素製造コスト（30円/Nm³）＋荷揚コスト（8円/Nm³） 38円/Nm³（約425円/kg-LH2）
内航船	0.33億円	600km輸送する際のコスト：約3.5円/Nm³（約40円/kg-LH2）
二次基地	4.77億円	- タンク容量：約770m³（水素燃料20日を貯蔵）を2基 - 付帯設備、人件費、設備費等を含む
ローリー	0.28億円	50km輸送する際のコスト：約3円/Nm³（約34円/kg-LH2）
空港内タンク	2.38億円	- タンク容量：約280m³（水素燃料一週間分を貯蔵）を2基 - 付帯設備、人件費、設備費等を含む
レフューラー （ローリー（空港内））	0.34億円	2台を導入することを想定 - レフューラーの改造費に水素航空機への注入ポンプ費用を含む、給油作業は空港の人員により実施
合計	11.59億円	
kmあたりコスト	2,116円/km	コスト：円/kmは、1日の就航の片道分（約1,500km）と仮定しコストから算出

(2) 導入初期－１（A-3：タンカーから燃料を供給している大規模空港）

A-3 は現行のジェット燃料を内航船で受け入れていることから、水素燃料についても空港内に大きな液化水素貯蔵タンクを作り、運搬船から直接燃料を荷下ろしするシナリオを想定した。水素製造から運搬船までのコストは水素製造コストに含まれているため、空港内の設備のみのコスト試算を実施した。以降に A-3 における導入・設備シナリオ及びコスト試算について整理する。

本コスト試算は水素航空機の導入初期、導入中期を対象としており、利用する水素量が限定的であるため、海外からの運搬船が荷下ろしを実施する大規模な貯蔵タンクの設置を想定していないが、今後の導入拡大を見込み、タンカーからの燃料を供給することを想定し、上記のシナリオでコスト試算を実施している点、留意が必要である。

【基本情報：導入・設備シナリオ】

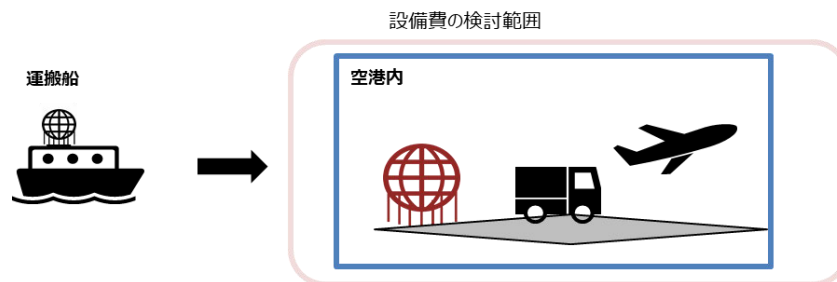


図 3.12 水素インフラの想定（A-3）

表 3.24 導入シナリオ（導入初期－１：A-3）

項目	内容
利用する水素	海外製造の水素
空港への燃料の受け入れ方法	液化水素運搬船⇒空港内の貯蔵タンク
導入を想定する水素航空機と台数	ターボプロップ機 1機（液化水素タンクの容量 1.5トン）
就航内容	1機あたりの総飛行距離約3,000km/日、複数往復
1日に必要となる水素量	2.25トン/日（燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では1日あたりの総飛行距離の半分である1,500km分の水素燃料を想定）

表 3.25 設備のシナリオ（導入初期－１：A-3）

設備名	詳細	備考
液化水素貯蔵タンク（空港内）	・空港で利用する20日分の水素燃料を貯蔵できるサイズを想定 【タンクサイズ】(20日×2.25トン)×1.20＝約55トン	容量 約770m ³ (約55トン) (冗長性を考慮し)2基
レフューラー（ローリー・空港内）	・空港内のタンクから航空機までの輸送及び給油を想定 ・レフューラーの改造費には、水素航空機の液化水素タンクへの注入ポンプ代も含む	(冗長性を考慮し)2台
＜設備の備考＞ ・タンク内に入れることができる水素量は液化水素貯蔵タンク容量の80%であることを考慮した ・(A-3)の場合の荷揚コストは、液化水素貯蔵タンク(空港内)の付帯設備費用と、空港内の作業員の人件費でカバーすると想定した		

表 3.26 必要な水素量（導入初期－１：A-3）

	必要量 (/日)	必要量 (/週)	必要量 (/年)	備考(算出根拠)
水素重量	2.25トン	15.75トン	821.25トン	・ターボプロップ機(液水タンクの容量 1.5トン)を1機導入 ・1機あたり3,000km/日の就航を想定、水素航空機の導入初期では片道分2.25トンの水素を給油することを仮定 ・BOG量は考慮していない値であることに留意
水素体積	31.72m ³	222.07m ³	11,579m ³	

【シナリオに基づいたコスト試算】

表 3.27 コスト試算（導入初期－１：A-3）

項目	コスト/年	備考(算出根拠)
水素コスト(調達)	2.79億円	・ 2030年の水素製造コスト: 30円/Nm ³ (約340円/kg-LH2) ※海外で製造した水素を直接、空港内のタンクに荷揚げするため荷揚げコストは考慮せず
空港内タンク	4.77億円	・ タンク容量: 約770m ³ (水素燃料20日を貯蔵)を2基 ・ 付帯設備、人件費、設備費等を含む
レフューラー (ローリー(空港内))	0.34億円	・ 2台を導入することを想定 ・ レフューラーの改造費に水素航空機への注入ポンプ費用を含む、給油作業は空港の人員により実施
合計	7.90億円	
kmあたりコスト	1,443円/km	・ コスト: 円/kmは、1日の就航の片道分(約1,500km)と仮定しコストから算出

(3) 導入初期－１（B-2：海岸から近い中規模空港）

B-2 は海との距離が近いので、内航船から直接空港内のタンクへ水素燃料を供給することを想定した。一次基地は供用で利用することを想定するため、荷揚げコストを考慮し、内航船での運搬以降を検討範囲として、コスト試算をした。以降に B-2 における導入・設備シナリオ及びコスト試算について整理する。

【基本情報：導入・設備シナリオ】

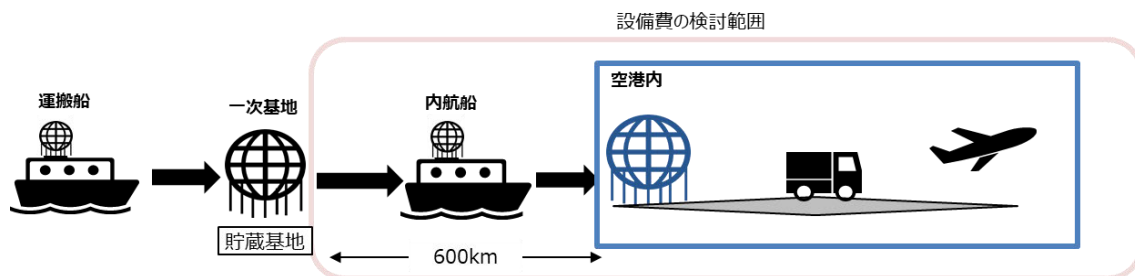


図 3.13 水素インフラの想定（B-2）

表 3.28 導入シナリオ（導入初期－１：B-2）

項目	内容
一次基地から主要港までの距離	約600km
利用する水素	海外製造の水素
空港への燃料の受け入れ方法	液化水素運搬船⇒一次基地(規模の大きな液化水素貯蔵基地)⇒内航船⇒空港内の貯蔵タンク
導入を想定する水素航空機と台数	ターボプロップ機 1機（液化水素タンクの容量 1.5トン）
就航内容	1機あたりの総飛行距離約3,000km/日、複数往復
1日に必要となる水素量	2.25トン/日(燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では1日あたりの総飛行距離の半分である1,500km分の水素燃料を想定)

表 3.29 設備のシナリオ（導入初期－１：B-2）

設備名	詳細	備考
液化水素貯蔵タンク（一次基地）	・巨大な水素貯蔵基地（他用途の利用も想定）	荷揚げコストが必要となる
内航船	・一次基地から二次基地（片道600km）まで燃料を運搬	片道600km
液化水素貯蔵タンク（空港内）	・空港で利用する20日分の水素燃料を貯蔵できるサイズを想定（・頻繁に内航船が就航しないことを想定し港の二次基地相当のサイズを想定した） 【タンクサイズ】（20日×2.25トン）×1.20＝約55トン	容量 約770m ³ （約55トン） （冗長性を考慮し）2基
レフューラー（ローリー・空港内）	・空港内のタンクから航空機までの輸送及び給油を想定 ・レフューラーの改造費には、水素航空機の液化水素タンクへの注入ポンプ代も含む	（冗長性を考慮し）2台
<設備の備考> ・タンク内に入れることができる水素量は液化水素貯蔵タンク容量の80%であることを考慮した		

表 3.30 必要な水素量（導入初期－１：B-2）

	必要量（/日）	必要量（/週）	必要量（/年）	備考（算出根拠）
水素重量	2.25トン	15.75トン	821.25トン	・ターボプロップ機（液水タンクの容量 1.5トン）を1機導入 ・1機あたり3,000km/日の就航を想定、水素航空機の導入初期では片道分2.25トンの水素を給油することを仮定 ・BOG量は考慮していない値であることに留意
水素体積	31.72m ³	222.07m ³	11,579m ³	

【シナリオに基づいたコスト試算】

表 3.31 コスト試算（導入初期－１：B-2）

項目	コスト/年	備考（算出根拠）
水素コスト（調達）	3.49億円	・2030年の水素製造コスト（30円/Nm ³ ）＋荷揚げコスト（8円/Nm ³ ） ・38円/Nm ³ （約425円/kg-LH2）
内航船	0.33億円	・600km輸送する際のコスト：約3.5円/Nm ³ （約40円/kg-LH2）
空港内タンク	4.77億円	・タンク容量：約770m ³ （水素燃料20日を貯蔵）を2基 ・付帯設備、人件費、設備費等を含む
レフューラー（ローリー（空港内））	0.34億円	・2台を導入することを想定 ・レフューラーの改造費に水素航空機への注入ポンプ費用を含む、給油作業は空港の人員により実施
合計	8.93億円	
kmあたりコスト	1,631円/km	・コスト：円/kmは、1日の就航の片道分（約1,500km）と仮定しコストから算出

(4) 導入初期－１（C-1：海岸から遠い小規模空港）

C-1は内陸にあるため、水素を貯蔵する拠点からローリーによる輸送が必要となる。また、C-1の近くにあるカーボンニュートラルポートに設置された一次基地を活用することを想定してシナリオを設定した。カーボンニュートラルポートの一次基地は供用で利用することを想定して荷揚げコストを考慮し、ローリーでの運搬以降を検討範囲として、コスト試算をした。以降にC-1における導入・設備シナリオ及びコスト試算について整理する。

【基本情報：導入・設備シナリオ】

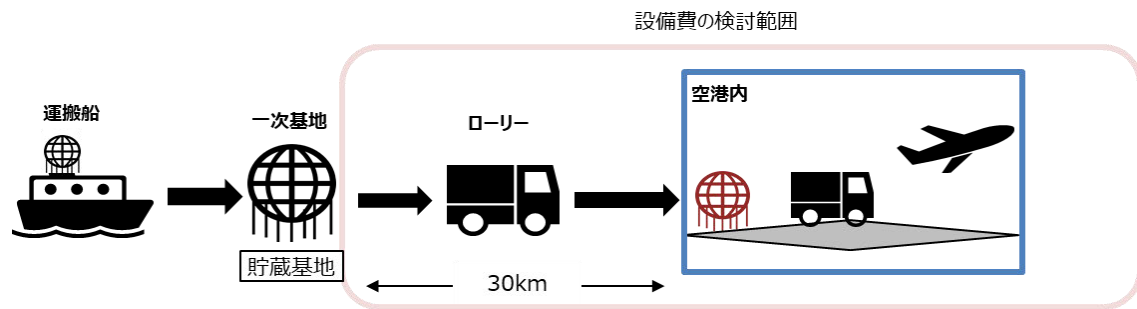


図 3.14 水素インフラの想定（C-1）

表 3.32 導入シナリオ（導入初期－１：C-1）

項目	内容
最寄りの主要港から空港までの距離	約30km
利用する水素	海外製造の水素
空港への燃料の受け入れ方法	液化水素運搬船⇒一次基地(規模の大きな液化水素貯蔵基地)⇒ローリーで空港内の貯蔵タンク
導入を想定する水素航空機と台数	ターボプロップ機 1機（液化水素タンクの容量 1.5トン）
就航内容	1機あたりの総飛行距離約3,000km/日、複数往復
1日に必要となる水素量	2.25トン/日(燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では1日あたりの総飛行距離の半分である1,500km分の水素燃料を想定)

表 3.33 設備のシナリオ（導入初期－１：C-1）

設備名	詳細	備考
液化水素貯蔵タンク（一次基地）	・巨大な水素貯蔵基地(他用途の利用も想定)	荷揚げコストが必要
液化水素貯蔵タンク（空港内）	・空港で利用する1週間分の水素燃料を貯蔵できるサイズを想定【タンクサイズ】(7日×2.25トン)×1.20＝約20トン	容量 約280m ³ (約20トン) (冗長性を考慮し) 2基
ローリー（一次基地⇒空港）	・二次基地から空港内への水素の輸送で利用することを想定	片道30km
レフューラー（ローリー・空港内）	・空港内のタンクから航空機までの輸送及び給油を想定 ・レフューラーの改造費には、水素航空機の液化水素タンクへの注入ポンプ代も含む	(冗長性を考慮し) 2台
<設備の備考> ・タンク内に入れることができる水素量は液化水素貯蔵タンク容量の80%であることを考慮した		

表 3.34 必要な水素量（導入初期－１：C-1）

	必要量 (/日)	必要量 (/週)	必要量 (/年)	備考(算出根拠)
水素 重量	2.25トン	15.75トン	821.25トン	- ターボプロップ機(液水タンクの容量 1.5トン)を1機導入 1機あたり3,000km/日の就航を想定、水素航空機の導入初期では片道分2.25トンの水素を給油することを仮定 - BOG量は考慮していない値であることに留意
水素 体積	31.72m ³	222.07m ³	11,579m ³	

【シナリオに基づいたコスト試算】

表 3.35 コスト試算（導入初期－１：C-1）

項目	コスト/年	備考(算出根拠)
水素コスト(調達)	3.49億円	2030年の水素製造コスト(30円/Nm³) + 荷揚コスト(8円/Nm³) 38円/Nm³(約425円/kg-LH2)
ローリー	0.23億円	30km輸送する際のコスト: 約2.4円/Nm³(約28円/kg-LH2)
空港内タンク	2.38億円	- タンク容量: 約280m³(水素燃料一週間分を貯蔵)を2基 - 付帯設備、人件費、設備費等を含む
レフューラー (ローリー(空港内))	0.34億円	2台を導入することを想定 - レフューラーの改造費に水素航空機への注入ポンプ費用を含む、給油作業は空港の人員により実施
合計	6.44億円	
kmあたりコスト	1,176円/km	コスト: 円/kmは、1日の就航の片道分(約1,500km)と仮定しコストから算出

(5) まとめ

導入初期－１における各類型化の条件及び試算結果を表 3.36 に整理する。本コスト試算では、必要となる水素燃料量は片道分の燃料量として算出している。例えば、A-3 と B-2 を結ぶ路線に水素航空機を導入する場合は A-3 のコストと B-2 のコストを加算することで、路線トータルの導入・運用コストを算出することができる。

また、本コスト試算にあたっては、水素航空機や設備等に、多数の仮定が含まれており、空港内の人件費、航空機のコスト等といった含まれていないコストもあるため、従来のジェット燃料と単純に比較はできない点に留意が必要である。

表 3.36 コスト試算まとめ（導入初期—1）

導入初期（2035年）空港にターボプロップ機を1機導入を想定した場合のコスト試算											
		水素運搬船	一次基地	内航船	二次基地 (付帯設備含)	ローリー 基地→空港	空港内タンク (付帯設備含)	レフューラー (ローリー)	年間水素コスト※3 (燃料は片道分)	コスト (億円/年)	
A-3	量 サイズ	水素の製造コストに含まれているため考慮しない	—	—	—	—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	2台	11,579m ³	7.90 億円/年 (35%※4)	
	価格 円/年		—	—	—	—	4.77億円	0.34億円	2.79億円		
B-2	量 サイズ		—	片道 600km	—	—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	2台	11,579m ³	8.93 億円/年 (39%※4)	
	価格 円/年		—	0.33億円	—	—	4.77億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚コスト含む)		
C-1	量 サイズ		国内の貯蔵設備の利用を想定	—	—	—	片道 30km	容量560m ³ (280m ³ ×2) ^{※2}	2台	11,579m ³	6.44 億円/年 (54%※4)
	価格 円/年			—	—	—	0.23億円	2.38億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚コスト含む)	
C-2	量 サイズ			—	片道 600km	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	片道 50km	容量560m ³ (280m ³ ×2) ^{※2}	2台	11,579m ³	11.59 億円/年 (30%※4)
	価格 円/年			—	0.33億円	4.77億円	0.28億円	2.38億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚コスト含む)	
	コスト(億円/年) (水素コストの割合)			水素kgあたりのコスト (円/ kg-LH2)		片道コスト (円/ km)		旅客1人あたり※5 (円/旅客・km)		1,000km 旅客1人あたり (円/ 旅客・1,000km)	
A-3	7.90億円/年 (35%※4)			962円/ kg-LH2		1,433円/ km		21円/ 旅客・km (7.3円/ 旅客・km※6)		20,619円/ 旅客・1,000km (7,285円/ 旅客・1,000km※6)	
B-2	8.93億円/年 (39%※4)			1,087円/ kg-LH2		1,631円/ km		23円/ 旅客・km (9.1円/ 旅客・km※6)		23,297円/旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※6)	
C-1	6.44億円/年 (54%※4)			784円/ kg-LH2		1,176円/ km		17円/ 旅客・km (9.1円/ 旅客・km※6)		16,804円/旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※6)	
C-2	11.58億円/年 (30%※4)		1,411円/ kg-LH2		2,116円/ km		30円/ 旅客・km (9.1円/ 旅客・km※6)		30,236円/旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※6)		

【備考】

- ※1 タンク容量は20日の水素を貯蔵できる量を想定
- ※2 タンク容量は7日の水素を貯蔵できる量を想定
- ※3 必要な水素燃料はBOG等は考慮していない
- ※4 全体のコストの中で水素価格が占める割合
- ※5 ターボプロップ機の座席数は100人、搭乗率は70%と仮定して計算を実施
- ※6 水素コストのみのコスト
- 水素燃料は片道分で算出している。例えば、A-3-B-2路線に水素航空機を導入する場合はA-3とB-2のコストを足すことで、トータルの導入・運用コストを算出することができる。
- 設備の基数（タンク、レフューラー）は冗長性を考慮し2基導入を想定。
- 設備については、一部一次基地を除き、水素航空機導入に伴い新設することを想定。
- 各コストにおいて考慮されている項目は以下の通りである。本コスト試算において、空港使用料、水素航空機の価格、業務委託費、一部人件費等は含まれていない価格であることを留意する必要がある。

項目	考慮されている項目
水素コスト	海外での製造を想定した水素製造コスト、国内の一次基地までの運搬コスト（荷揚げコストは含まず）
液化水素貯蔵タンク	液化水素貯蔵タンク設備費、付帯設備費、メンテナンス関連費、人件費
内航船	設備費、修繕費、人件費、燃料費等
ローリー	設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費
レフューラー	設備費、メンテナンス管理費

- 試算を実施するにあたり、みずほサーチ&テクノロジーズが以下の数値に関しては仮定を置いているため、留意が必要である。

項目	仮定した項目
水素航空機	航続距離、座席数、燃料タンクサイズ
輸送距離	内航船・ローリーの運搬距離
液化水素貯蔵タンク	基地で必要なタンクサイズ、人員数
レフューラー	本体価格、使用年数

3.3.4 水素インフラの設備規模の検討（導入初期－２、導入中期）

水素インフラの設備規模に関わるシナリオを検討するために、導入中期以降に複数機の水素航空機の就航が想定される大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して、Small スタート、Large スタートの２種類を想定して、コストを試算した。

（1）シナリオの整理

導入初期－２、導入中期におけるシナリオを表 3.37 に整理した。

Small スタート－２では、導入初期の導入に耐えうる最低限の規模のインフラを構築して、複数機の水素航空機が就航する導入中期には増加する水素量に見合う設備を追加することを想定する。Large スタートでは、導入初期の時点で導入中期の拡張を視野に入れた規模の設備を導入しておき、導入中期ではレフューラーのみを追加するシナリオを想定して、導入初期を Small スタートとするシナリオ（Small スタート－２）、導入初期を Large スタートとするシナリオ（Large スタート）の比較を行う。

さらに、基準ケースのシナリオ（Small スタート－１）として、導入中期においても導入初期の運用のまま実施するシナリオを用意した。

表 3.37 シナリオの整理

	導入初期－２		導入中期	
	条件	設備	条件	追加設備
Smallスタート1 (基準)	ターボプロップ機 1機 必要水素量 2.25トン/日	ターボプロップ機 1機に対応できる規模 (導入初期－１と同様)	ターボプロップ機 1機 必要水素量 2.25トン/日	なし
Smallスタート2		ターボプロップ機 1機に対応できる規模 (導入初期－１と同様)		タンク、 レフューラー追加
Largeスタート		ターボプロップ機 3機 ターボファン機 1機 導入中期に対応できる規模	ターボプロップ機 3機 ターボファン機 1機 必要水素量 11.25トン/日	レフューラー追加

また、設備のサイズや数は、3.3.3 と同様の考え方を採用した。本シナリオにおける試算対象である A-3、B-2 における導入初期、導入中期の設備概要を図 3.15 に示す。

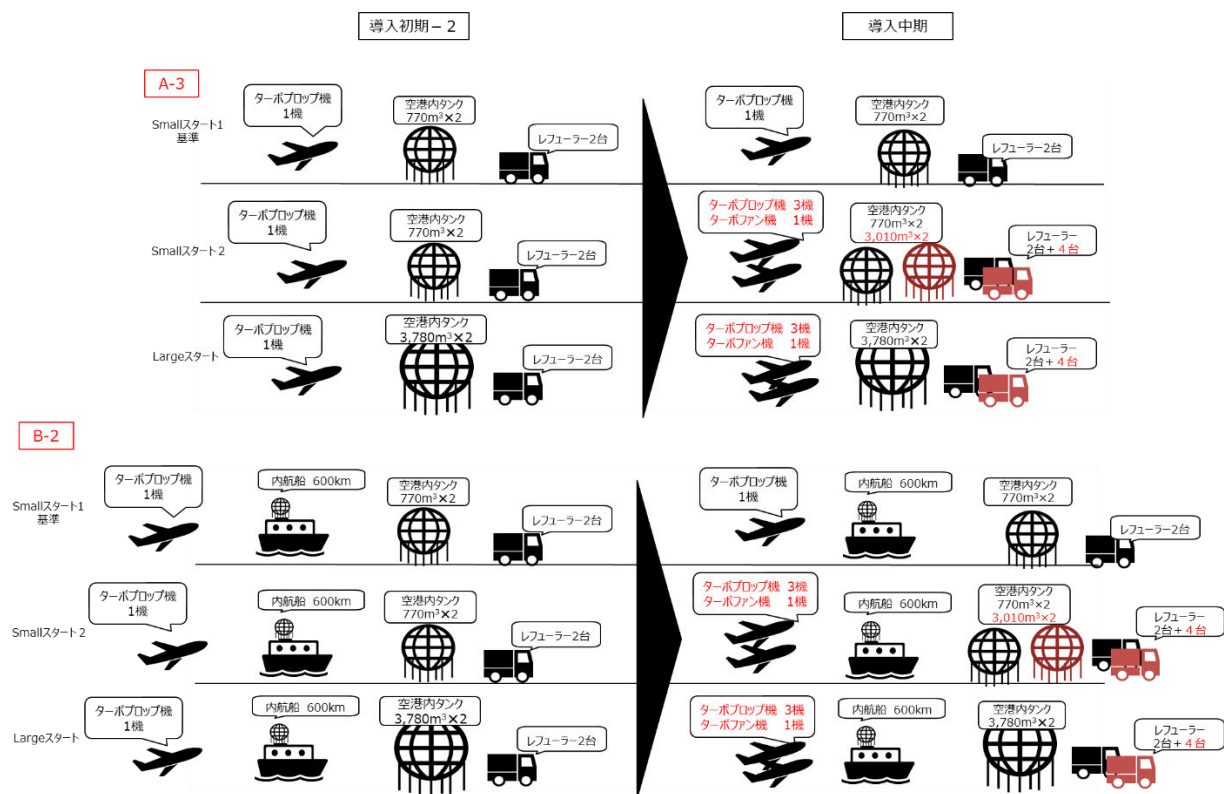


図 3.15 シナリオの想定（導入初期－２、導入中期）

(2) 導入初期のコスト試算（導入初期－２）

(1) で示したシナリオに従い、導入初期におけるコストを算出した結果を表 3.38 に示す。コストの算出方法は 3.3.3 と同様の考え方を採用した。本コスト試算では、必要となる水素燃料量は片道分の燃料量として算出している。例えば、A-3 と B-2 を結ぶ路線に水素航空機を導入する場合は A-3 のコストと B-2 のコストを加算することで、路線トータルの導入・運用コストを算出することができる。

また、本コスト試算にあたっては、水素航空機や設備等に、多数の仮定が含まれており、空港内の人件費、航空機のコスト等といった含まれていないコストもあるため、従来のジェット燃料と単純に比較はできない点には留意が必要である。

表 3.38 コスト試算まとめ（導入初期—2）

導入初期（2035年）空港にターボプロップ機を1機を想定した場合のコスト試算（導入規模検討）										
		水素運搬船	一次基地	内航船	二次基地 （付常設備含）	ローリー 基地→空港	空港内タンク （付常設備含）	レフューラー （ローリー）	年間水素コスト※3 （燃料は片道分）	コスト （億円/年）
A-3 Small-1,2	量 サイズ	水素の製造コストに含まれているため考慮しない	—	—	—	—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	2台	11,579m ³	7.90 億円/年 (35%※4)
	価格 円/年		—	—	—	—	4.77億円	0.34億円	2.79億円	
A-3 Large	量 サイズ		—	—	—	—	容量7,560m ³ (3,780m ³ ×2)※2	2台	11,579m ³	16.60 億円/年 (17%※4)
	価格 円/年		—	—	—	—	13.47億円	0.34億円	2.79億円	
B-2 Small-1,2	量 サイズ	国内の貯蔵設備の利用を想定	片道 600km	—	—	—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	2台	11,579m ³	8.93 億円/年 (39%※4)
	価格 円/年		0.33億円	—	—	—	4.77億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚げコスト含む)	
B-2 Large	量 サイズ		片道 600km	—	—	—	容量7,560m ³ (3,780m ³ ×2)※2	2台	11,579m ³	17.63 億円/年 (20%※4)
	価格 円/年		0.33億円	—	—	—	13.47億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚げコスト含む)	
		コスト(億円/年) (水素コストの割合)	水素kgあたりのコスト (円/ kg-LH2)	片道コスト (円/ km)	旅客1人あたり※5 (円/ 旅客・km)	1,000km 旅客1人あたり (円/ 旅客・1,000km)				
A-3 Small1,2		7.90億円/年 (35%※4)	962円/ kg-LH2	1,443円/ km	21円/ 旅客・km (7.3円/ 旅客・km※6)	20,619円/ 旅客・1,000km (7,285円/ 旅客・1,000km※6)				
A-3 Large		16.60億円/年 (17%※4)	2,022円/ kg-LH2	3,032円/ km	43円/ 旅客・km (7.3円/ 旅客・km※6)	43,319円/ 旅客・1,000km (7,285円/ 旅客・1,000km※6)				
B-2 Small1,2		8.93億円/年 (39%※4)	1,087円/ kg-LH2	1,631円/ km	23円/ 旅客・km (9.1円/ 旅客・km※6)	23,239円/ 旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※6)				
B-2 Large		17.63億円/年 (20%※4)	2,147円/ kg-LH2	3,220円/ km	46円/ 旅客・km (9.1円/ 旅客・km※6)	45,998円/ 旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※6)				
【備考】										
※ 1 タンク容量は導入初期において20日の水素燃料を貯蓄できる量を想定										
※ 2 タンク容量は導入中期において20日の水素燃料を貯蓄できる量を想定（11.25×20×1.2=約3,780m ³ 液化水素貯蔵タンクの容量は、タンクに入れられる量を考慮して20%を仮定した。）										
※ 3 必要な水素燃料はBOG等は考慮していない										
※ 4 全体のコストの中で水素価格が占める割合										
※ 5 ターボプロップ機の座席数は100人、搭乗率は70%と仮定し計算を実施										
※ 6 水素コストのみのコスト										
・ タンクのサイズ、水素コストの算出方法や考え方は導入初期－1と同様である。										
・ 水素燃料は片道分で算出している。例えば、A-3→B-2路線に水素航空機を導入する場合はA-3とB-2のコストを足すことで、トータルの導入・運用コストを算出することができる。										
・ コストには設備費以外に維持費、人件費等も含まれている。										
・ 設備については、一部一次基地を除き、水素航空機導入に伴い新設することを想定。										
・ 設備の基数（タンク、レフューラー）は冗長性を考慮し2基導入を想定。										
・ 各コストにおいて考慮されている項目は以下の通りである。本コスト試算において、空港使用料、水素航空機の価格、業務委託費、一部人件費等は含まれていない価格であることを留意する必要がある。										
項目		考慮されている項目								
水素コスト		海外での製造を想定した水素製造コスト、国内の一次基地までの運搬コスト（荷揚げコストは含まず）								
液化水素貯蔵タンク		液化水素貯蔵タンク設備費、付常設備費、メンテナンス関連費、人件費								
内航船		設備費、修繕費、人件費、燃料費等								
ローリー		設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費								
レフューラー		設備費、メンテナンス管理費								
・ 試算を実施するにあたり、みずほサーチ&テクノロジーズが以下の数値に関しては仮定を置いているため、留意が必要である。										
項目		仮定した項目								
水素航空機		航続距離、座席数、燃料タンクサイズ								
輸送距離		内航船・ローリーの運搬距離								
液化水素貯蔵タンク		基地に必要なタンクサイズ、人員数								
レフューラー		本体価格、使用年数								

(3) 導入中期のコスト試算（導入中期）

（１）で示したシナリオに従い、導入中期のコストを算出した結果を表 3.39 に示す。コストの算出方法は 3.3.3 と同様の考え方を採用した。

本コスト試算にあたっては、水素航空機や設備等に、多数の仮定が含まれており、空港内の人件費、航空機のコスト等といった含まれていないコストもあるため、従来のジェット燃料と単純に比較はできない点には留意が必要である。

表 3.39 コスト試算まとめ（導入中期）

導入中期（2040年）空港にターボプロップ機3機、ターボファン機1機を想定した場合のコスト試算（導入規模検討）									
		水素運搬船	内航船	空港内タンク (付帯設備含)	中期新設 空港内タンク (付帯設備含)	レフューラー (ローリー)	中期追加 レフューラー (ローリー)	年間水素コスト※3 (燃料は片道分)	コスト (億円/年)
A-3 Small-1	量 サイズ	水素の製造コストに含まれているため考慮しない	—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	—	2台	—	11,579m ³	7.90 億円/年 (35%※4)
	価格 円/年		—	4.77億円	—	0.34億円	—	2.79億円	
A-3 Small-2	量 サイズ		—	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	容量6,020m ³ (3,010m ³ ×2)※1	2台	4台	57,898m ³	31.36 億円/年 (45%※4)
	価格 円/年		—	4.77億円	11.61億円	0.34億円	0.68億円	13.96億円	
A-3 Large	量 サイズ		—	容量7,560m ³ (3,780m ³ ×2)※2	—	2台	4台	57,898m ³	28.45 億円/年 (49%※4)
	価格 円/年		—	13.47億円	—	0.34億円	0.68億円	13.96億円	
B-2 Small-1	量 サイズ		片道 600km	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	—	2台	—	11,579m ³	8.93 億円/年 (39%※4)
	価格 円/年		0.33億円	4.77億円	—	0.34億円	—	3.49億円 (荷揚げコスト含む)	
B-2 Small-2	量 サイズ		片道 600km	容量1,540m ³ (770m ³ ×2)※1	容量6,020m ³ (3,010m ³ ×2)※1	2台	4台	57,898m ³	36.49 億円/年 (48%※4)
	価格 円/年		1.64億円	4.77億円	11.61億円	0.34億円	0.68億円	17.45億円 (荷揚げコスト含む)	
B-2 Large	量 サイズ		片道 600km	容量7,560m ³ (3,780m ³ ×2)※2	—	2台	4台	57,898m ³	33.58 億円/年 (52%※4)
	価格 円/年		1.64億円	13.47億円	—	0.34億円	0.68億円	17.45億円 (荷揚げコスト含む)	

【備考】

- ※1 タンク容量は合計で20日×2基（冗長性、点検を考慮）の水素燃料を貯蓄できる量を想定
- ※2 タンク容量は合計で20日の水素燃料を貯蓄できる量を想定
- ※3 必要な水素燃料はBOG等は考慮していない
- ※4 全体のコストの中で水素価格が占める割合
- ・コストには設備費以外に維持費、人件費等も含まれている。
- ・設備については、一部一次基地を除き、水素航空機導入に伴い新設することを想定。
- ・各コストにおいて考慮されている項目は以下の通りである。本コスト試算において、空港使用料、水素航空機の価格、業務委託費、一部人件費等は含まれていない価格であることを留意する必要がある。

項目	考慮されている項目
水素コスト	海外での製造を想定した水素製造コスト、国内の一次基地までの運搬コスト（荷揚げコストは含まず）
液化水素貯蔵タンク	液化水素貯蔵タンク設備費、付帯設備費、メンテナンス関連費、人件費
内航船	設備費、修繕費、人件費、燃料費等
ローリー	設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費
レフューラー	設備費、メンテナンス管理費

- ・試算を実施するにあたり、みずほリサーチ&テクノロジーズが以下の数値に関しては仮定を置いているため、留意が必要である。

項目	仮定した項目
水素航空機	航続距離、座席数、燃料タンクサイズ
輸送距離	内航船・ローリーの運搬距離
液化水素貯蔵タンク	基地で必要なタンクサイズ、人員数
レフューラー	本体価格、使用年数

併せて、導入初期 5 年間、導入中期 25 年間で運用した場合を想定し、コスト換算を実施した結果を表 3.40 に示す。

表 3.40 導入初期 5 年、導入中期 25 年の運用を仮定した場合のコスト試算

導入中期（2040年）のコスト試算（導入規模検討）						
	コスト※ ¹ (億円/年)	水素kgあたりのコスト (円/ kg-LH2)	片道コスト (円/ km)	旅客1人にあたり※ ² (円/ 旅客・km)	1,000km 旅客1人あたり (円/ 旅客・1,000km)	備考
A-3 S-1	7.90億円/年	962円/ kg-LH2	1,443円/ km	21円/ 旅客・km (7.3円/ 旅客・km※ ³)	20,619円/ 旅客・1,000km (7,285円/ 旅客・1,000km※ ³)	ターボプロップ機 1 機 必要水素量 2.25トン/日
A-3 S-2	27.48億円/年	211円/ kg-LH2	1,157円/ km	12円/ 旅客・km (5.3円/ 旅客・km※ ³)	11,937円/ 旅客・1,000km (5,261円/ 旅客・1,000km※ ³)	ターボプロップ機 3 機 ターボファン機 1 機 必要水素量 11.25トン/日
A-3 L	26.48億円/年	204円/ kg-LH2	1,116円/ km	12円/ 旅客・km (5.3円/ 旅客・km※ ³)	11,513円/ 旅客・1,000km (5,261円/ 旅客・1,000km※ ³)	
B-2 S-1	8.93億円/年	1,087円/ kg-LH2	1,631円/ km	23円/ 旅客・km (9.1円/旅客・km※ ³)	23,239円/ 旅客・1,000km (9,107円/ 旅客・1,000km※ ³)	ターボプロップ機 1 機 必要水素量 2.25トン/日
B-2 S-2	31.90億円/年	245円/ kg-LH2	1,344円/ km	14円/旅客・km (6.6円/ 旅客・km※ ³)	13,872円/ 旅客・1,000km (6,577円/ 旅客・1,000km※ ³)	ターボプロップ機 3 機 ターボファン機 1 機 必要水素量 11.25トン/日
B-2 L	30.92億円/年	238円/ kg-LH2	1,303円/ km	13円/ 旅客・km (6.6円/ 旅客・km※ ³)	13,448円/ 旅客・1,000km (6,577円/ 旅客・1,000km※ ³)	
【備考】						
※ 1 導入初期 5 年、導入中期 25 年で換算した1年あたりのコスト						
※ 2 Small-1は導入初期はターボプロップ機1機（座席数100）総飛行距離は3,000km、Small-2、Largeは導入初期はターボプロップ機1機（座席数100）総飛行距離は3,000km、導入中期はターボプロップ機 3 機（座席数100）の総飛行距離は9,000km、ターボファン機1機（座席数200）の総飛行距離が6,000km、搭乗率70%とし、「搭乗人キロ」を算出し、km当たりのコストを算出。水素燃料のコストは片道分で算出をしている。						
※ 3 水素コストのみのコスト						

4 コスト試算に関する分析と空港周辺インフラの課題整理

本章では、3章で実施したコスト試算について分析を行うとともに、水素航空機に関わる空港周辺インフラの課題を整理する。なお、あくまでも本検討での類型化は水素燃料に対応した空港周辺インフラの構築にあたってのケーススタディとして仮定したものであり、必ずしも今後の具体的な計画や見通しとして議論したものではない点に留意されたい。

4.1 空港の類型化の実施

空港の情報をもとに、空港の類型化を検討し、空港の立地区分と空港の規模区分（主に、発着する航空機サイズ）の組み合わせにより、空港を類型化することとした。空港の類型化区分を表4.1に示す。

表 4.1 空港の類型化区分

立地区分	規模区分	概要
A	1	タンカーから燃料を供給している小規模空港
	2	タンカーから燃料を供給している中規模空港
	3	タンカーから燃料を供給している大規模空港
B	1	海岸に近い小規模空港
	2	海岸に近い中規模空港
	3	海岸に近い大規模空港
C	1	海岸から遠い小規模空港
	2	海岸から遠い中規模空港
	3	海岸から遠い大規模空港
【備考】 <立地区分> A) 空港に水素を直接運搬することが可能と想定される空港 B) A 以外の空港で、海岸に近接している空港 C) A、B のいずれにも該当しない空港 <規模区分> 1) 小規模空港： ・ 小型ジェット機、100 人以下の航空機のみが発着している空港 ・ 水素航空機導入初期（2035 年）に、想定される水素航空機サイズと同等のサイズの航空機の発着が主な空港 2) 中規模空港： ・ 中型ジェット機、小型ジェット機の運航が主に発着している空港（一部では大型ジェット機の運航もあり） ・ 水素航空機導入中期（2040 年～）に、想定される水素航空機サイズと同等のサイズの		

航空機の発着がある空港) ・ 年間の航空燃料供給量が 20 万 kL 以下 3)大規模空港： ・ 大型ジェット機、中型ジェット機の運航が主に発着している空港 ・ 年間の航空燃料供給量が 20 万 kL 以上

コスト試算にあたっては 9 区分の中から、導入初期に想定されるサイズの航空機が就航している路線の有無、空港の規模、現状の燃料の受け入れ方法、水素の利活用等を考慮して、表 4.2 に示す 4 つの類型化に対してコスト試算を実施した。

表 4.2 コスト試算を実施した類型化

区分	類型化名	類型化に分類された空港の特徴
A-3	タンカーから燃料を供給している大規模空港	・ ターボプロップ機（ボンバルディア DHC8-Q400 等）の就航がある ・ カーボンニュートラルポートに選定された港が近くにある ・ （水素航空機向けではないものの）水素製造設備の設置計画がある
B-2	海岸から近い中規模空港	・ ターボプロップ機（ボンバルディア DHC8-Q400 等）の就航がある ・ 海岸から近いいためタンカーからの給油の可否も視野に入れての検討が可能である ・ 港－空港間をパイプラインで輸送する場合は空港内で液化が必要となる
C-1	海岸から遠い小規模空港	・ 小型ジェット機の就航がある（エアバス社が開発予定の水素航空機（ターボプロップ機）より、さらに小型のターボプロップ機の就航がある） ・ 再生可能エネルギー（風力）を利用した水素製造の可能性がある ・ カーボンニュートラルポートに選定された港が近くにある
C-2	海岸から遠い中規模空港	・ ターボプロップ機（ATR72 等）の就航がある ・ 現状、周囲に水素貯蔵拠点、水素燃料製造拠点はなないため、新規設備が必要となる（現在の国内水素製造拠点：千葉県市原市、山口県周南市、大阪府堺市）
—	その他	・ 最低限の水素インフラで対応を想定する ・ 既存の貯蔵拠点がある場合は、ローリーで必要量の水素を供給することが可能と想定する

4.2 コスト試算のシナリオについて

コスト試算のシナリオに関係する主な項目である、水素航空機の導入機数と水素インフラの想定を以下に整理する。

(1) 導入初期・導入中期における水素航空機の導入機数の想定

選定した類型化に対して、コスト試算を実施する際の導入初期・導入中期における水素航空機の導入機数の想定を表 4.3 に示す。

表 4.3 導入初期・導入中期における水素航空機の導入機数の想定

時期	ターボプロップ機	ターボファン機	水素必要量 (/日)	水素必要量 (/週)	水素必要量 (/年)
導入初期	1 機	0 機	2.25 トン (31.72m ³)	15.75 トン (222.07m ³)	821.25 トン (11,579m ³)
導入中期	3 機	1 機	11.25 トン (158.62m ³)	78.75 トン (1,110m ³)	4,106 トン (57,898m ³)
・ターボプロップ機（航続距離：1,000km、液化水素タンク：1.5 トン）で、1 日あたり 3,000km の就航を想定 ・ターボファン機（航続距離：2,000km、液化水素タンク：3.0 トン）で、1 日あたり 6,000km の就航を想定 ・水素燃料の給油は飛行の都度実施すると仮定して、水素航空機の導入初期では 1 日あたりのターボプロップ機（1 機）の総飛行距離の半分である 1,500km 分の水素燃料を想定 ・水素航空機の導入中期では 1 日あたりのターボプロップ機（3 機）とターボファン機（1 機）の総飛行距離の半分（ターボプロップ機：1,500km 分×3 機分、ターボファン機：3,000km×1 機分）の水素燃料を想定 ・BOG による水素量の減少は考慮していない点に留意					

(2) 水素インフラの想定

選定した類型化の特徴に沿って、図 4.1 に示すような、水素インフラを想定した。

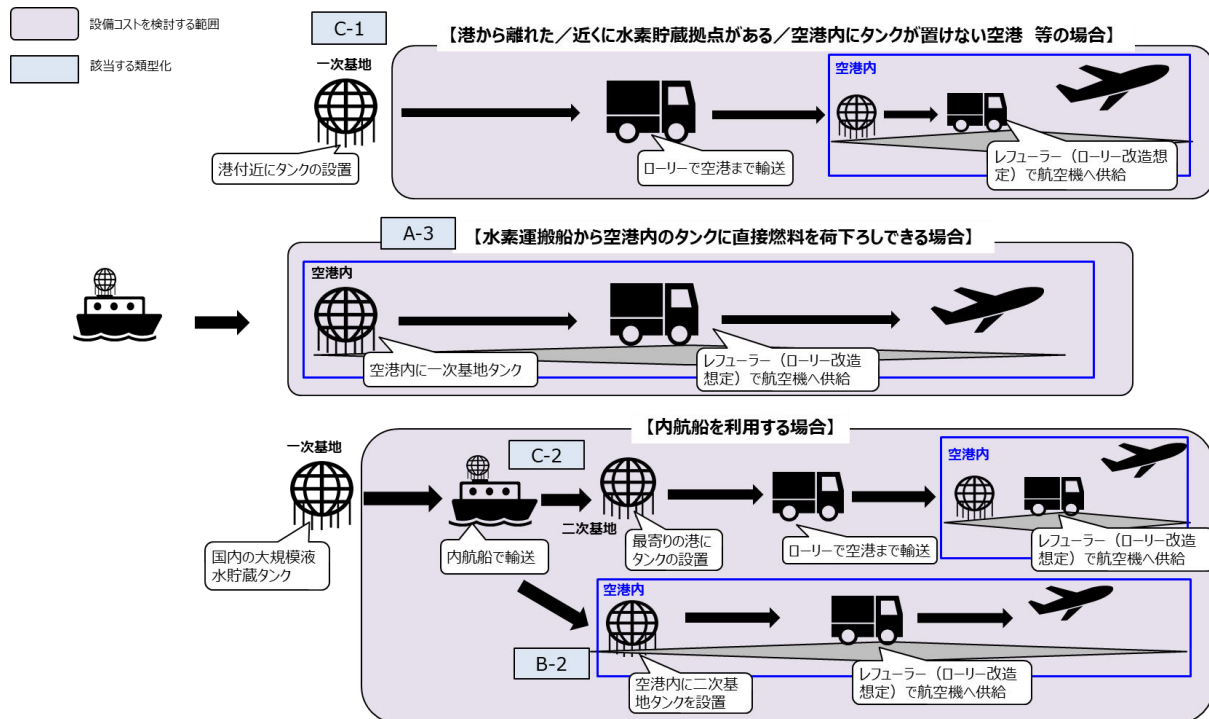


図 4.1 各類型化における水素インフラの想定

4.3 各設備の想定について

コスト試算にあたり、各設備のコスト算出の基本的な考え方をまとめる。

表 4.4 各設備のコスト算出の基本的な考え方

項目	内容
確保すべき水素量	・ 導入初期、導入中期のシナリオに基づき、1 年間に必要となる水素量を算出
(国内拠点までの) 水素の製造・輸送のコスト	【利用する水素の想定】 ・ 海外で製造した液化水素を利用することを想定 【水素のコストの算出】 ・ 海外での水素の製造～国内の一次基地までの運搬コストは水素・燃料電池戦略ロードマップの値である 30 円/Nm ³ を採用 ・ 一次基地を供用を想定した場合、文献を参考に荷揚げコスト 8 円/Nm ³ を考慮
内航船による輸送コスト	【内航船のコストの算出】 ・ 文献を参考に、運搬距離に応じた Nm ³ あたりのコスト（設備費、修繕費、船用品費、人件費等を含む）を採用 ・ 文献では、内航船の価格は 12.33 億円/船（LNG 船をもとに船型を想定）としてコストを算出
ローリーによる輸送コスト	【ローリーのコストの算出】 ・ 文献を参考に、運搬距離に応じた Nm ³ あたりのコスト（設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費等を含む）を採用 ・ 文献では、ローリーの価格は 5,000 万円/台（容量 20kL）としてコストを算出
液化水素貯蔵タンク (一次基地)	【一次基地のコストの考え方】 ・ 水素航空機導入にあたり新設はせず供用で利用を想定した場合は、液化水素貯蔵タンクの設備費等は考慮せず、文献を参考に、荷揚げコスト 8 円/Nm ³ を考慮

項目	内容
液化水素貯蔵タンク (二次基地、空港内)	【タンクのコストの算出】 ・文献を参考に、25,000 m³ (12,500m³×2) の初期導入費：283.2 億円（設備費、メンテナンス費、人件費を含む）を基準とし、スケールファクターを利用してタンク容量とコストを算出 ・文献における設備費には付帯設備のコストも含む 【タンクの容量の算出】 ・導入初期、導入中期のシナリオに基づき、タンク容量を算出 ・空港内のタンク（C-1、C-2）においては7日分の水素を保管できる容量のタンクとした ・A-3 及び B-2 の空港内タンク、二次基地のタンクは、船による運搬のため頻繁に水素燃料を運搬が難しいことを想定し、20 日分の水素を保管できる容量のタンクとした ・タンクの容量は、1 日あたりに必要となる水素量×日数（7 日または 20 日）×1.2（タンク内に入れることができる水素量はタンク容量の 80%であることを考慮）で算出 【その他】 ・タンクはメンテナンス時の対応、冗長性を考慮し、2 基設置することを想定
レフューラー	【レフューラーのコスト算出】 ・レフューラーの価格は 10,000 万円/台を採用。ローリー（5,000 万円/台）+レフューラーへの改造費（5,000 万円/台）とした ・文献及びみずほリサーチ&テクノロジーズの仮定より、1 台当たりのコストとして 1,700 万円/年（メンテナンス費、人件費等を含む）を採用 【その他】 ・レフューラーはメンテナンス時の対応、冗長性を考慮した台数を想定
水素航空機の燃料タンクに 水素を注入するポンプ	・現時点では市場製品がないため、レフューラーの改造費用に含まれるとして扱う

4.4 コスト試算に関する分析

コスト試算は各類型化に対して、3つのシナリオに沿って実施した。シナリオの概要を表 4.5 に示す。ただし、片道コストは旅客キロ（乗客1人あたり1kmあたりのコスト、（単位：旅客・km））ベースのコストとしている点に留意する。

表 4.5 シナリオの概要

シナリオ名	概要
導入初期－1	・全類型化（A-3、B-2、C-1、C-2）に対して、Small スタートを想定した場合の導入初期コストを試算
導入初期－2	・大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して導入初期に Small スタート、Large スタートを想定した場合の導入初期コストを試算
導入中期	・大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して導入初期に Small スタート、Large スタートを想定した場合の導入中期コストを試算

シナリオに沿ったコスト試算は、3.3.3（導入初期－1）、3.3.4（導入初期－2、導入中期）に示した通りである。以降に、コスト試算に関する分析を導入初期と導入中期に分けて説明する。

（1）類型化におけるコスト試算（導入初期－1の分析）

導入初期にはターボプロップ機1機が導入されることを仮定した同一条件の下で、コスト試算を実施した。コスト試算の結果を表 4.6 と図 4.2 に示す。

コスト試算結果からわかるように、水素のコストと液化水素貯蔵タンクに関わるコストが大半を占めている。水素航空機の導入に向けては、両者のコストをさらに低減させることが求められる。

導入初期を想定したコストを低い順に整理すると、 $C-1 < A-3 < B-2 < C-2$ となった。コストの内訳は、液化水素貯蔵タンクに関わるコストと水素のコストが大半を占めており、必要となる設備の数や輸送回数もコストに影響を与えている。

今回のコスト試算でコストが最も安い C-1 のケースは、カーボンニュートラルポート（一次基地）を利用し、空港までの輸送は陸路での輸送のみを想定している。したがって、新規に設置する水素貯蔵タンクの容量は小さく、基数も少ないため、安価なコストとなった。一方、コストが最も高い C-2 のケースは、新たに荷揚げ基地（二次基地）を設置し、空港内にも水素貯蔵タンクを設置することを想定したため、水素貯蔵タンクに関わるコストが増えている。加えて、空港内に水素燃料を運ぶまでに、内航船とローリーを利用することを想定したため、他のケースと比べて水素の輸送コストが余分にかかっている。

以上より、水素航空機の導入コストを検討する際には、空港までの水素輸送が容易であるか、既存の貯蔵施設を利用できるかといった観点が重要であると考えられる。

また、導入初期では、全類型化において共通でターボプロップ機1機の導入することを想定したため、空港規模のコスト試算への影響は小さい結果となっている。

表 4.6 類型化におけるコスト試算（導入初期－１）

導入初期（2035年）空港にターボプロップ機を1機導入を想定した場合のコスト試算												
		水素運搬船	一次基地	内航船	二次基地 （付帯設備含）	ローリー 基地⇒空港	空港内タンク （付帯設備含）	レフューラー （ローリー）	年間水素コスト※3 （燃料は片道分）	コスト （億円/年）	片道コスト （円/ km）	
A-3	量 サイズ	水素の製造コストに含まれているため考慮しない	－	－	－	－	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	2台	11,579m ³	7.90 億円/年 (35% ^{※4})	1,443 円/ km	
	価格 円/年		－	－	－	－	4.77億円	0.34億円	2.79億円			
B-2	量 サイズ		－	片道 600km	－	－	－	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	2台	11,579m ³	8.93 億円/年 (39% ^{※4})	1,631 円/ km
	価格 円/年		－	0.33億円	－	－	－	4.77億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚げコスト含む)		
C-1	量 サイズ	国内の貯蔵設備の利用を想定	－	－	－	片道 30km	容量560m ³ (280m ³ ×2) ^{※2}	2台	11,579m ³	6.44 億円/年 (54% ^{※4})	1,176 円/ km	
	価格 円/年		－	－	－	0.23億円	2.38億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚げコスト含む)			
C-2	量 サイズ		片道 600km	容量1,540m ³ (770m ³ ×2) ^{※1}	片道 50km	容量560m ³ (280m ³ ×2) ^{※2}	2台	11,579m ³	11.59 億円/年 (30% ^{※4})	2,116 円/ km		
	価格 円/年		0.33億円	4.77億円	0.28億円	2.38億円	0.34億円	3.49億円 (荷揚げコスト含む)				

【備考】

- ※1 タンク容量は20日の水素を貯蔵できる量を想定
- ※2 タンク容量は7日の水素を貯蓄できる量を想定
- ※3 必要な水素燃料はBOG等は考慮していない
- ※4 全体のコストの中で水素価格が占める割合
- 水素燃料は片道分で算出している。例えば、A-3ーB-2路線に水素航空機を導入する場合はA-3とB-2のコストを足すことで、トータルの導入・運用コストを算出することができる。
- 設備については、一部一次基地を除き、水素航空機導入に伴い新設することを想定。
- 設備の基数（タンク、レフューラー）は冗長性を考慮し2基導入を想定。
- 各コストにおいて考慮されている項目は以下の通りである。本コスト試算において、空港使用料、水素航空機の価格、業務委託費、一部人件費等は含まれていない価格であることを留意する必要がある。

項目	考慮されている項目
水素コスト	海外での製造を想定した水素製造コスト、国内の一次基地までの運搬コスト（荷揚げコストは含まず）
液化水素貯蔵タンク	液化水素貯蔵タンク設備費、付帯設備費、メンテナンス関連費、人件費
内航船	設備費、修繕費、人件費、燃料費等
ローリー	設備費、人件費、燃料費、修繕費、一般管理費
レフューラー	設備費、メンテナンス管理費

- 試算を実施するにあたり、みずほリサーチ&テクノロジーズが以下の数値に関しては仮定を置いているため、留意が必要である。

項目	仮定した項目
水素航空機	航続距離、座席数、燃料タンクサイズ
輸送距離	内航船・ローリーの運搬距離
液化水素貯蔵タンク	基地に必要なタンクサイズ、人員数
レフューラー	本体価格、使用年数

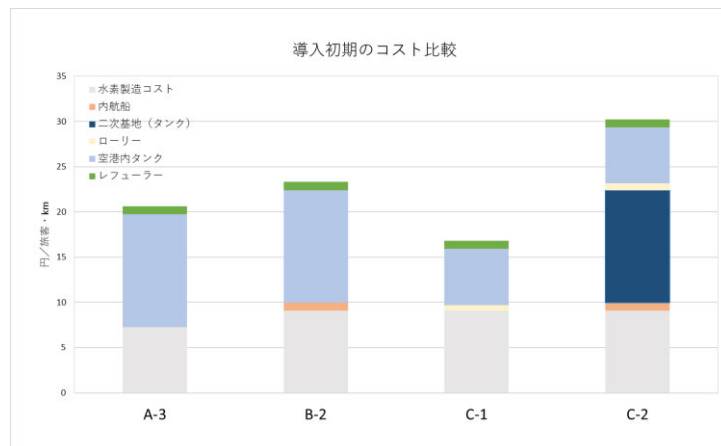


図 4.2 類型化におけるコスト比較（導入初期－１）

(2) 導入規模の検討（導入初期－2、導入中期の分析）

導入中期以降、複数の水素航空機が就航すると想定される大規模・中規模空港（A-3、B-2）に対して、導入初期の設備規模の想定を2種類（Small、Large）用意してコスト試算を実施した。コスト試算の結果を表4.7と図4.3に整理する。

導入初期のコストに関しては、導入中期を想定した規模の設備を導入するLargeスタートの結果は、導入初期のみに対応した設備を導入するSmallスタート－2と比較して、8.7億円/年（22円/旅客・km）の費用が余分に必要となる結果となった。

一方、導入中期のコストに関しては、Smallスタート－2の場合は導入中期で追加する水素貯蔵タンクの設備コストが必要となるため、Largeスタートの方が低くなる結果となった。ただし、水素航空機の導入機数を導入中期でも合計で4機と少数にしているため、Smallスタート－2とLargeスタートの差はわずかの差にとどまっている。

また、基準ケースとした、導入中期も拡張を行わずに、導入初期のまま運用するSmallスタート－1の場合、1年あたりの投資額そのものは抑えられるものの、中期に水素航空機の導入が進むとした他のケースと比較すると、片道コストは割高となる結果となった。中期に水素航空機の導入機数を増加することにより、片道コストが低減されることが確認された。

表 4.7 導入規模の検討（導入初期－2、導入中期）

導入初期					導入中期			
		コスト (億円/年)	片道コスト (円/ 旅客・km)			コスト (億円/年)	片道コスト (円/ 旅客・km)	
A-3	S1	7.90億円/年	21円/ 旅客・km	➡		7.90億円/年	21円/ 旅客・km	
	S2	7.90億円/年	21円/ 旅客・km			27.48億円/年	12円/ 旅客・km	
	L	16.60億円/年	43円/ 旅客・km			26.48億円/年	12円/ 旅客・km	
B-2	S1	8.93億円/年	23円/ 旅客・km			8.93億円/年	23円/ 旅客・km	
	S2	8.93億円/年	23円/ 旅客・km			31.90億円/年	14円/ 旅客・km	
	L	17.63億円/年	46円/ 旅客・km			30.92億円/年	13円/ 旅客・km	

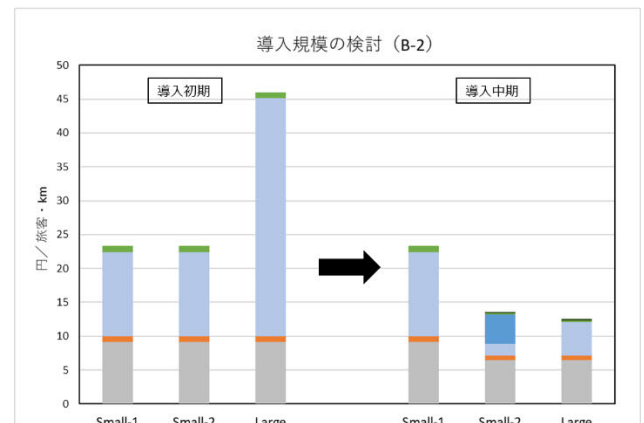
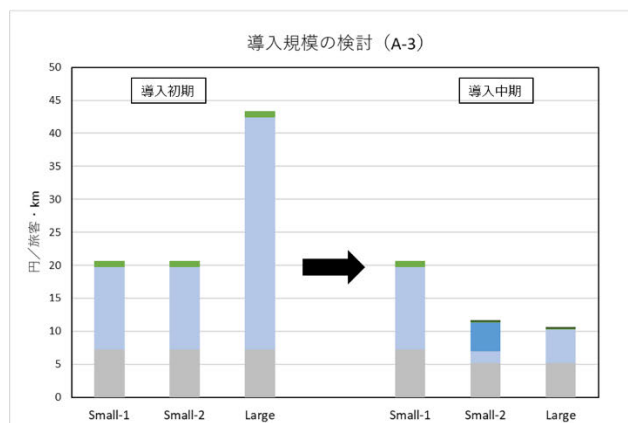


図 4.3 導入規模の検討（導入初期－2、導入中期）（旅客キロベース）

次に、コスト以外に導入規模の検討も加えた分析を表 4.8 に示す。Small スタートー 2 のケースでは、導入初期のコストを抑えられ、水素航空機導入失敗時のリスクを下げるができる。一方で、水素航空機の導入機数が順調に増えた場合には柔軟に運航数を増強することができない、設備拡張に伴う費用増加や敷地確保が必要となるといったデメリットがある。

Larg スタートにおいては、将来の水素航空機数の増加に合わせた柔軟な運航が可能であり、導入が順調に進んだ場合はコストを抑えることができる。しかし、導入初期の設備コストが高く、水素航空機の導入が順調に進まない場合には遊休設備が生じるといったデメリットがある。

表 4.8 導入規模も考慮した、メリット・デメリット分析

	初期		中期(導入開始5年後)		メリット	デメリット
	条件	設備	条件	設備		
Small-1		初期条件に対応可能な最小限の規模	ターボプロップ機 1機	変更なし		
Small-2	ターボプロップ機 1機	初期条件に対応可能な最小限の規模	ターボプロップ機 3機	タンク+レフューラー追加	- 初期コスト低 - 水素航空機の導入失敗等のリスクは低い	- 柔軟に運航数を増強することが困難 - タンク新設時の敷地確保 - 拡張費用がかかる
Large		中期の導入に対応可能な規模	ターボファン機 1機	レフューラー追加	- 柔軟に運航数を増強可能 - 導入が拡張された際に追加設備の必要がなくコストが低	- 初期コスト大 - 水素航空機導入が進まなかった場合に遊休部分が発生

今回のコスト試算では、水素航空機の導入に応じて設備拡張を行う場合 (Small スタートー 2) と比較して、水素航空機数の増加を見越して初期の段階から設備を設置する場合 (Large スタート) の方が、水素航空機の導入が順調に進む場合は乗客 1 人あたり 1km あたりのコストはわずかながら安くなる結果が得られた。しかし、設備規模を検討するにあたっては、コストの観点のみならず、設備拡張時の追加費用や敷地の確保、就航させる路線の検討、水素航空機導入失敗時のリスクといった観点からの検討も実施した上で判断する必要がある。

(3) 座席キロあたりのコスト分析

以下の分析においては、ユニットコスト (参考 3) の算出方法と合わせるために、座席キロ (1 つの座席を 1km 運ぶためのコスト、単位：座席・km) ベースあたりのコストを算出し分析を実施した。ここでの数値の単位は旅客キロではない点に留意する。

今回のコスト試算における座席キロあたりの分析結果を図 4.4 に示す。図 4.4 には、各設備に関わるコストの占める割合も示している。本コスト試算で算出しているのは、水素燃料のコストとインフラ設備に関わるコストの一部であり、空港使用料、水素航空機の価格、業務委託費、一部人件費等は含まれていない。

本コスト試算では、導入初期の場合、1 座席あたり 1km あたりのコストは、11.7～21.2 (円/ 座席・km) である。導入中期では水素航空機の導入機数が増えることで、1 座席あたり 1km あたりのコストは 7.4～9.5 (円/ 座席・km) に低下する。また、液化水素貯蔵タンク等のインフラを追加で設置する場合でも、導入機数が増えることで水素燃料の需要が拡大する場合は、1 座席あたり 1km あたりのコストは下がる結果となった。

参考 3 において示す、ジェット燃料におけるユニットコストと本コスト試算では算出条件等が異なるため、単純な比較はできないが、今回のコスト試算結果から、現行のユニットコストに対

して、水素航空機を導入した場合の水素インフラコストはまだ高いと考えられる。水素航空機に関わる個々のインフラについては、さらなるコスト削減に向けた技術開発が望まれる。

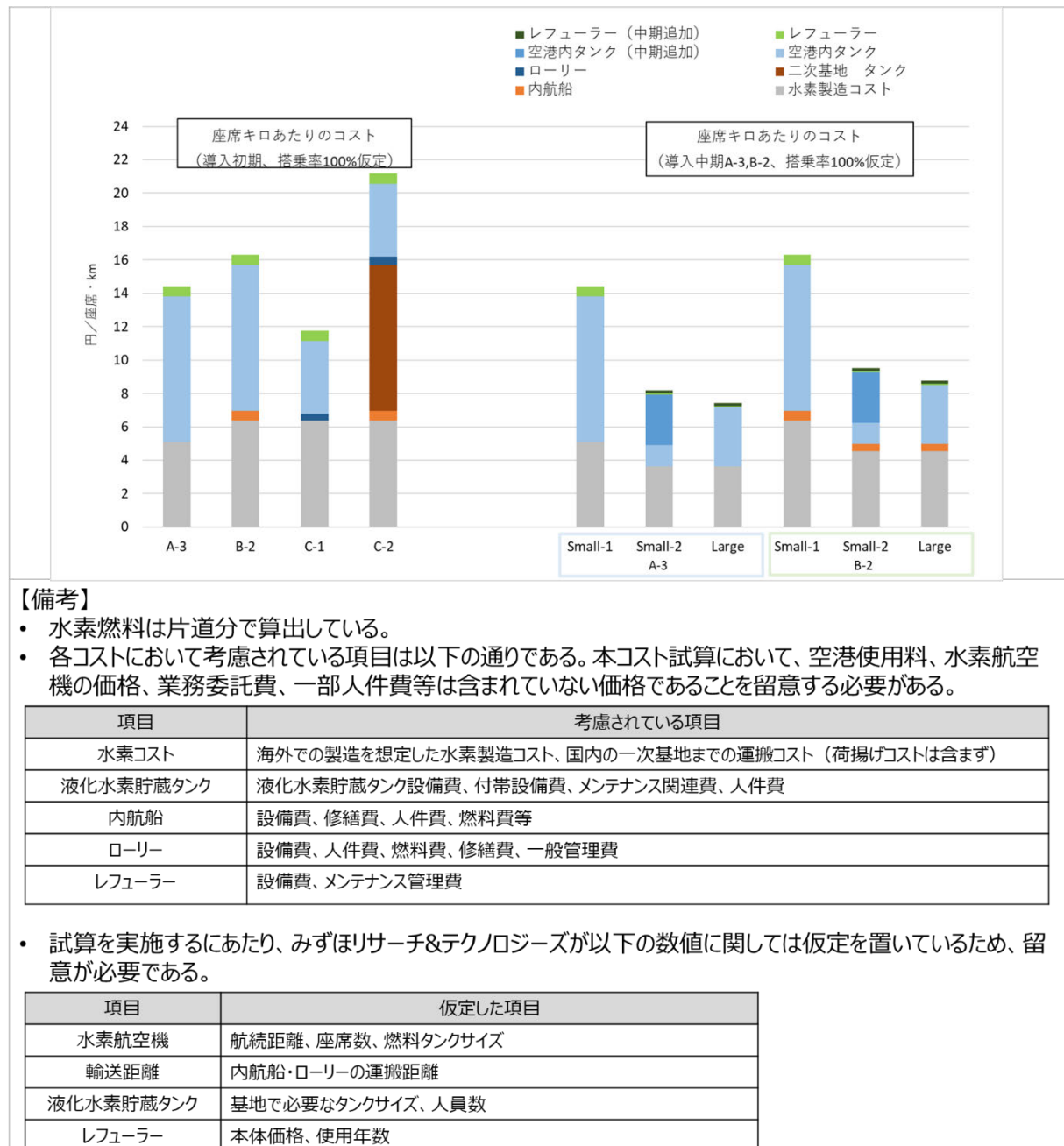


図 4.4 本コスト試算結果（座席キロベース）

<参考3：ジェット燃料におけるユニットコスト>

現行のジェット燃料については、燃料費、人件費、機材費、空港使用料、その他業務委託費等から構成されるユニットコストという指標がある。ユニットコストは、航空業界ではCASK (Cost per Available Seat Kilo) と呼ばれており、1つの座席を1km運ぶために必要なコスト指標である。

平成27年度のユニットコストを図4.5に示す。平成27年度時点でのユニットコストは各社により異なるが、6～15（円/座席・km）の範囲にあり、今回のコスト試算との主な比較対象と考えられる燃料費については2.7（円/座席・km）程度である。

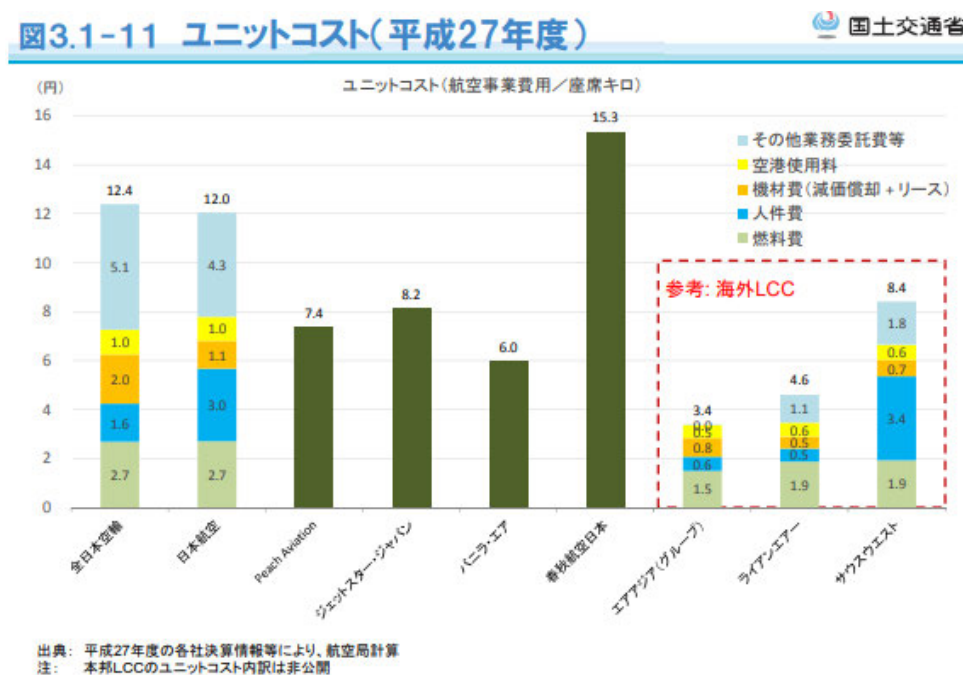


図 4.5 ジェット燃料のユニットコスト（座席キロベース）¹²⁾

¹²⁾ 出典：LCC の事業展開の促進（国土交通省）
<https://www.mlit.go.jp/common/001179271.pdf>、2022 年 3 月閲覧)

4.5 コスト試算における課題について

今回のコスト試算では、類型化に対して、水素燃料のコスト及び関連する設備に関わるコスト算出を実施した。今回のコスト試算に際しての課題を以下に整理する。

(1) BOG に係る検討

水素航空機の燃料タンクに液化水素を注入する際には、燃料注入時の BOG やパイプ冷却に利用する等、燃料タンクの搭載容量よりも多くの液化水素が必要となる。しかし、今回のコスト試算においては、具体的な関連情報を入手することができなかったため、空港内の液化水素貯蔵タンクの液化水素のすべてが燃料タンクへ供給されると仮定して、必要な水素量を見積もっている。

今後、BOG に関する検討資料が公開された際には、BOG の発生量等を見込んだ水素量をベースにコスト試算を行い、コスト検討の精緻化を図ることが望まれる。

(2) 水素燃料の給油等に係る人員について

今回のコスト試算では、設備の一部については人件費を含む数値に基づいて算出を実施している。水素燃料の給油は空港内の人員で対応することを想定したが、新たに給油人員を確保できるかの課題もある。また、給油以外の空港内の人件費は考慮していない。将来、水素航空機の導入にあたっては、水素燃料を取り扱う人員に関して、より詳細な検討が必要と思われる。

(3) 代替空港に係る検討

今回のコスト試算では、代替空港を考慮せず、トラブル時は出発空港に戻ることを仮定して、発着空港以外のコストは考慮していない。一方、現行の運用においては、就航路線に対して発着空港以外に最低 2 つの代替空港を定めていて、運航中にトラブルが発生した場合は、代替空港を利用することとなっている。代替空港を出発空港とする場合は往復の燃料を搭載する等、オペレーションに制約が生じる点には注意が必要である。

将来、水素航空機の運用において代替空港を考慮する場合、就航先の空港以外の代替空港を定めることになるため、発着空港に加えて代替空港に係るインフラ設備の設定やコストを検討する必要がある。

(4) 導入シナリオに係る検討

今回のコスト試算では、導入初期については水素航空機数は限定的になることを仮定して、1 空港あたり 1 機、1 路線の導入を想定して試算を実施した。今後、水素航空機の本格導入まで見据えたシナリオ検討を行う場合は、海外の検討状況も踏まえて、水素航空機の導入機数、路線数、導入時期を想定して、水素関連のインフラを整備する空港数等を含めたシナリオ検討が必要となる。その際には、初期に導入が想定される小型のターボプロップ機が現在就航するのは収支が厳しいローカル路線が主であることから、航空会社の採算へのインパクトが大きい点も考慮して検討を進める必要があると考えられる。

また、水素航空機の本格導入期には路線数が増えることが予想され、現行のジェット燃料と同様に、大規模空港を中心として、水素燃料に対応したハイドラントシステムの構築が必要と見込

まれる。現時点では技術的に見通せない点があるものの、水素燃料に対応したハイドラントシステムの構築も含めたシナリオ検討も進めることが望まれる。

(5) 化石燃料の利用に係る検討

今回のコスト試算では、空港周辺インフラの設備費用を中心に検討しているが、実際の運用の場面では、必要となる電力として化石燃料に由来する電力を利用することも想定される。詳細なコスト試算を行う場合、化石燃料を使用する点については、排出権取引の動向等まで含めたコスト算出の可能性のある点に留意する。

4.6 その他の課題について

今回のコスト試算にあたっては空港周辺インフラは最低限必要な設備構成を想定したが、水素航空機の燃料タンクへ給油する液化水素ポンプについては市場製品がない等、コスト以外の課題もある。コスト以外の課題を以下に整理する。

(1) 水素航空機の導入に向けた空港周辺インフラの技術開発

今回のコスト試算では、水素に関係する空港周辺インフラは最低限必要な設備構成を想定してコスト試算を行っている。水素航空機本体の開発検討と並行して、空港周辺インフラに関わる設備についても開発検討が進められているが、最低限必要な設備の中では液化水素用のレフューラーが市場製品として存在していない状況である。

今回のコスト試算では、ローリーを改造したレフューラーを利用することを仮定したが、ローリーをレフューラーへ改造するためには、水素航空機の燃料タンクへ給油する液化水素ポンプが必要となる。しかしながら、現時点では市場製品がなく、新規開発が必要な状況である。

現状、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の水素社会構築技術開発事業において液化水素ポンプの開発が進められており、2021 年度に宇宙航空研究開発機構（JAXA）の能代ロケット試験場において運転試験を実施する計画があり、さらには 2022 年度中には液化水素ポンプの上市が予定されている。

また、水素航空機への給油に対応する液化水素ポンプに最低限要求される条件を想定した、吐出圧力が 10 気圧、500L/分の流量条件の液化水素ポンプは国内で 10 年以内に開発できる見通しが立っている状況であり、レフューラーへの搭載を目標として、液化水素ポンプの小型化に向けた技術開発支援が今後望まれる。

その他に、水素航空機の燃料タンクとレフューラーとのインターフェースについては航空機メーカー、タンク製造メーカーとの協働で検討を進める必要がある。さらに、予冷時や入熱により発生するガスを回収する機器（ベントライン）を水素航空機向けに開発することも必要となる。

(2) 用地確保、既存のインフラ設備との併用に係る検討

空港内あるいは空港周辺に液化水素貯蔵タンクを実際に設置しようとする場合、貯蔵タンクの設置場所の検討、用地確保が必要となる。今回のコスト試算では、導入中期に空港内の液化水素貯蔵タンクを増やすシナリオについても試算を行っているが、タンクの基数が増える場合には、

必要な用地は更に増える。

今回の類型化検討では、空港の用地確保の可能性は考慮していないが、水素航空機を駐機するためのスペースに余裕があり、かつ、現状のジェット燃料タンクから一定の離隔距離を確保する場所に液化水素貯蔵タンクを設置できる空港であるかが、水素航空機導入にあたり選定条件の一つになると考えられる。

また、今回のコスト試算では、現行の航空機運航の一部を水素航空機による運航へ代替することを前提にしている。そのため、大規模空港についてはハイドラントシステムを始めとするジェット燃料向けのインフラ設備と水素航空機に関わるインフラ設備の併用についても検討する必要がある。

さらに、現行の法令では、ジェット燃料においては消防法、水素燃料においては高圧ガス保安法に則り、適切な離隔距離等を保つ必要がある。国内空港には水素ステーションが既に導入されている空港があることから、過去に実施された水素ステーションの設置に関する離隔距離の考え方等を参考情報としつつ、必要に応じてリスクアセスメント等を実施し、安全な離隔距離の検討が望まれる。さらには、離隔距離の判断基準以外にも、例えば、水素が漏えいした場合の安全対策等についても検討を進めることが求められる。

5 まとめ

本事業においては、空港の特徴を類型化し、液化水素が国内一次拠点に荷揚げされてからの国内供給と空港周辺インフラについて、水素航空機の導入初期・導入中期のコスト試算を実施した。具体的には、欧州、国内における水素航空機に関わる技術開発の状況と上期検討結果も踏まえ、国内における水素航空機の導入は、2035年頃に定員100人以下の小型ターボプロップ機から導入が始まり、続いて2040年頃に定員200人程度のターボファン機の導入がされることを想定シナリオとして、コスト分析を行った。以降に、本事業における検討概要を整理する。

(1) 空港類型化、前提と仮定

コスト試算の実施にあたり空港のケーススタディを設定するために、国内空港の情報を燃料の受け入れ方法に影響を与える“空港の立地”と、設備規模を検討に影響を与える“空港の規模”の観点から整理した。整理した情報を踏まえ、空港の立地区分と規模区分（主に、発着する航空機サイズ）の組み合わせを指標とし、空港の類型化を実施し、類型化の中から、導入初期、導入中期に導入が想定される航空機サイズの就航路線の有無や、水素の利活用のしやすさ等を考慮して空港周辺インフラのコスト試算を実施する4つの類型化空港を選定した。

(2) コスト試算における前提、シナリオの整理

(1) で選定した空港に対して各々に水素インフラを想定し、以下の3シナリオにおけるコスト試算を行った。

- | | |
|--------|--|
| 導入初期－1 | ・全類型化に対して、Small スタートを想定した場合 |
| 導入初期－2 | ・大規模・中規模空港に対して初期に Small スタート、Large スタートを想定した場合 |
| 導入中期 | ・大規模・中規模空港に対して初期に Small スタート、Large スタートを想定した場合 |

また、コスト試算に用いたシナリオ、コストの構成を図 5.1 及び図 5.2 に示す。今回の試算においては、みずほリサーチ&テクノロジーズが仮定した情報が含まれている点は留意が必要である。

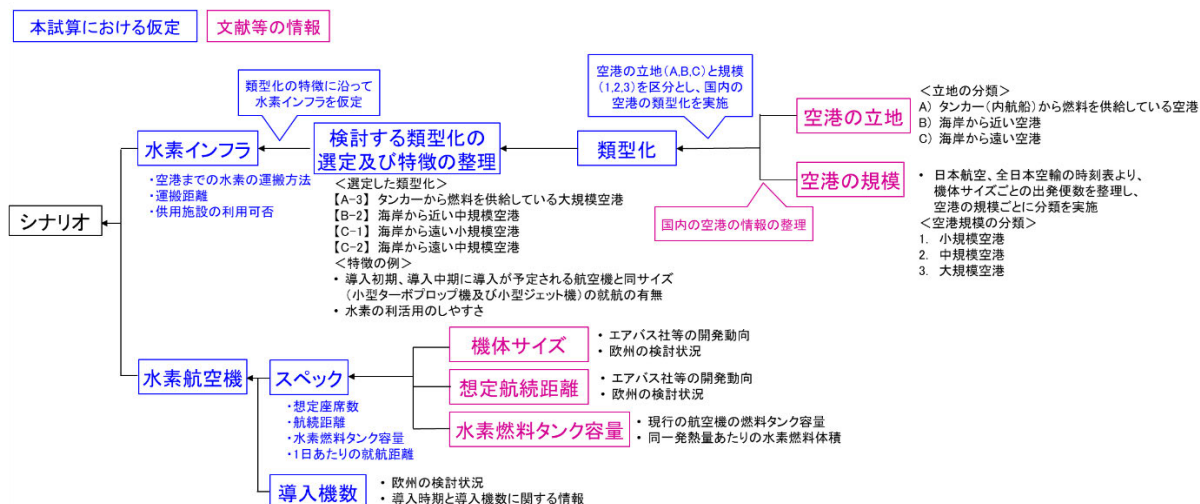


図 5.1 シナリオの整理

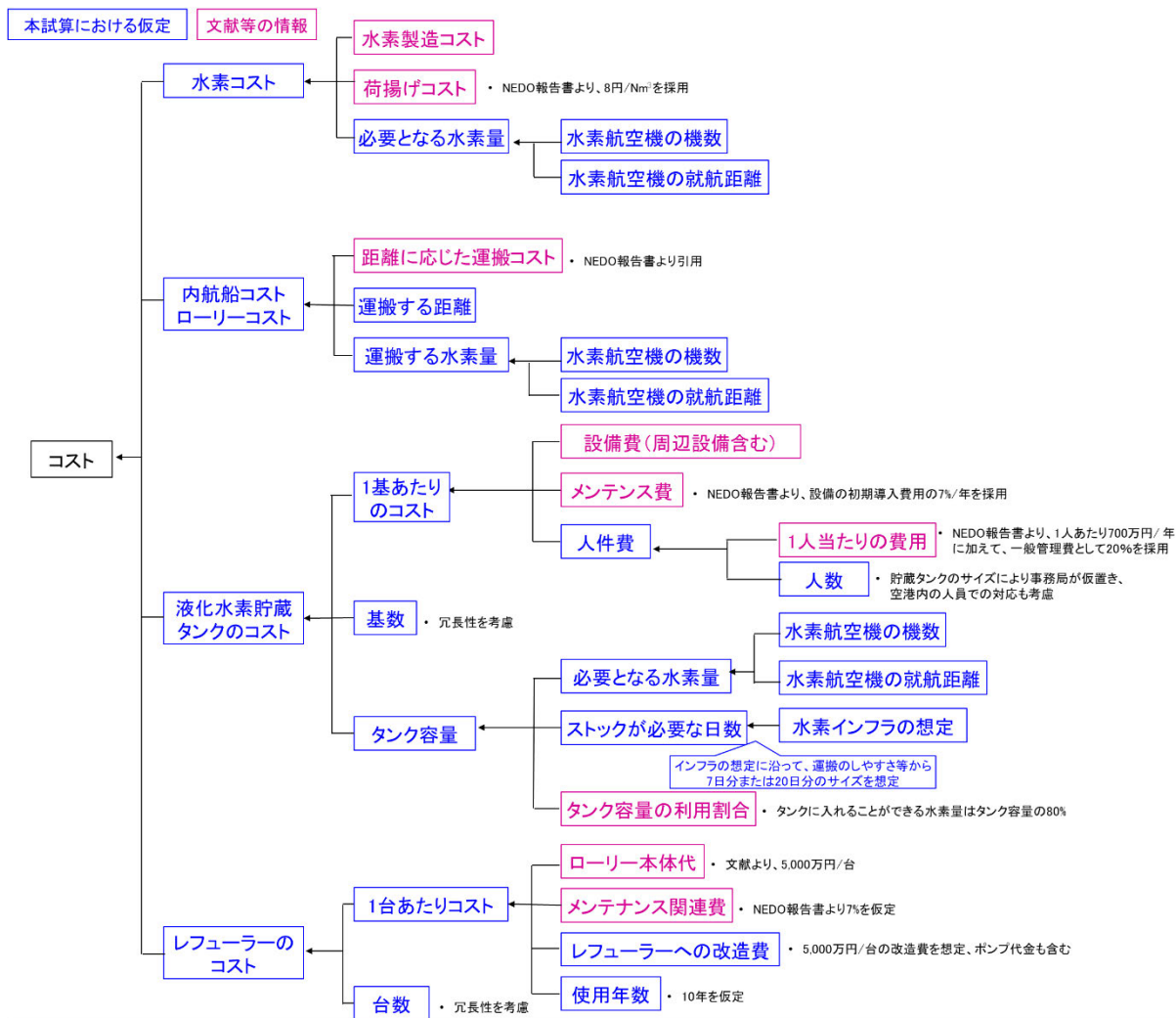


図 5.2 コストの整理

(3) コスト試算の結果

今回のコスト試算では、水素燃料のコストと液化水素貯蔵タンクに関わるコストが大半を占めていた。水素航空機の導入に向けては、両者のコストをさらに低減させることが必要である。

導入初期に最低限のインフラを整備すると仮定した場合（導入初期—1）においては、必要となる設備の数や輸送回数もコストに影響を与えていた。つまり、同条件で水素航空機の導入コストを検討する際には、空港までの水素輸送が容易であるか、既存の貯蔵施設を利用できるかといった観点が重要であると考えられる。

設備の規模の検討（導入初期—2、導入中期）においては、水素航空機の導入に応じて設備拡張を行う場合と比較して、水素航空機数の増加を見越して初期の段階から設備を設置する場合の方が、水素航空機の導入が順調に進む場合は旅客・km あたりのコストはわずかながら安価になる結果が得られた。しかし、設備規模を検討するにあたっては、コストの観点のみならず、設備拡張時の追加費用や用地の確保、航空機の就航路線の検討等の観点からも検討を実施する必要があると考えられる。

(4) 課題整理

今回のコスト試算は導入初期、中期の限定的なシナリオを想定した試算であった。今後、本格的な導入に向けて精緻なコスト試算を実施する際には、今回の試算では考慮されていない、BOG の量、導入規模のバリエーション、代替空港等を考慮した検討が必要となる。

また、導入の実現に向けては、水素航空機や液化水素ポンプをはじめとした水素インフラに関わる技術開発や、空港におけるジェット燃料との併用の検討、法令の整備等も進めていく必要がある。

水素航空機の導入の実現に向けては、海外の検討状況を考慮しつつ様々な観点より導入方針、課題等、必要な検討を戦略的に進めていく必要がある。

(5) 結びに

水素航空機は水素を燃料とするため、運航時には温室効果ガスの CO₂ を排出しない利点がある。また、欧州の検討（Clean Sky 2）¹³⁾では、航空機燃料に関して地球温暖化係数（GWP）を指標とする環境性の比較も触れられており、水素は合成燃料に対して勝るという指摘もなされている。この分析には不確定性が多く含まれ、将来の環境規制内容に依存する部分も大きい。今後強い環境規制が課された際には、環境性の側面から水素航空機が注目される可能性もある。

航空業界では SAF（持続可能な航空燃料）の導入検討も進められており、水素航空機、SAF それぞれの長所を生かしたすみ分けが行われ、航空分野における CO₂ 排出量削減に資することを期待したい。

¹³⁾ 出典：Clean Sky 2 報告書・Annex 1

(https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf, 2022 年 3 月閲覧)