

Ⅱ.14.④ 火災に対する設計上の考慮への 適合性

措置を講ずべき事項

II. 設計，設備について措置を講ずべき事項

14. 設計上の考慮

④火災に対する設計上の考慮

火災発生防止，火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の方策を適切に組み合わせて，火災により施設の安全性を損なうことのない設計であること。

キャスク仮保管設備は，火災発生防止，火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の方策を適切に組み合わせて，火災により施設の安全性を損なうことのない設計とする。

○ 火災に対する設計上の考慮

火災により施設の安全性が損なわれることを防止するために火災発生防止，火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の方策を適切に組み合わせた措置を講じる。

(実施計画：II-1-14-2)

○ 火災

火災の発生が考えられる箇所について，火災の早期検知につとめるとともに，消火器を設置することで初期消火を可能にし，火災により安全性を損なうことのないようにする。

(実施計画：II-2-13-3～4)

○ 外部火災

キャスク仮保管設備に対する外部火災影響については，「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド（平成25年6月 原子力規制委員会）（以下，「ガイド」という。）」に基づき評価する。想定される外部火災に対し，キャスク仮保管設備への影響がないことを確認する。

1 評価条件

1.1 評価方針

外部火災による影響については，以下を考慮する必要がある。

- ・火災の規模（輻射エネルギー，火炎の強度・面積・形状，伝播速度）
- ・二次的影響の有無（煙，ガス，爆発による飛来物等）

キャスク仮保管設備はキャスクを1基毎にコンクリートモジュールに格納しているため，火災発生時にコンクリートモジュールが受ける影響を評価する。

二次的影響については、コンクリートモジュールはコンクリート製であること、キャスクは密封された金属容器であることから煙及びガスによる影響は無いと考えられる。そのため、爆発による爆風圧の影響及び飛来物の影響を評価する。

1.2 火災の種類

考慮すべき発電所敷地外の火災として以下を検討する。

(1) 森林火災

発電所敷地外の 10km 以内を発火点とした森林火災が発電所に迫った場合でも、キャスクがその影響を受けないよう適切な防護措置が施されており、その二次的な影響も含めて、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計とする。

(2) 近隣の産業施設の火災・爆発

近隣の産業施設で発生した火災・爆発により、原子炉施設が、その影響を受けないよう適切な防護措置が施されており、その二次的な影響も含めて、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計とする。なお、発電所敷地外の 10km 以内を発火点とし、森林等に延焼することによって発電所に迫る場合は (1) の森林火災として評価する。(ただし、発電所敷地内に存在する石油類やヒドラジンなどの危険物タンク火災については、(3) の航空機墜落と同様に原子炉施設への熱影響評価等を行う。)

(3) 航空機墜落による火災

航空機の墜落に伴う火災により、原子炉施設が、その影響を受けないよう適切な防護措置が施されており、その二次的な影響も含めて、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計とする。

2 火災評価

2.1 森林火災

森林火災で評価する内容はガイドの附属書A「森林火災の原子力発電所への影響評価について（以下、「附属書A」という。）」に基づく。

2.1.1 評価手法の概要

森林火災の想定は以下の通り。

- (1) 森林火災における各樹種の可燃物量は現地の植生から求める。
- (2) 気象条件は過去10年間を調査し、森林火災の発生件数の多い月の最小湿度、最高気温、及び最大風速の組合せとする。
- (3) 風向は卓越方向とし、発電所の風上に発火点を設定する。ただし、発火源と発電所の位置関係から風向きを卓越方向に設定することが困難な場合は、風向データ等から適切に設定できるものとする。
- (4) 発電所から直線距離10kmの間で設定する。
- (5) 発火源は最初に人為的行為を考え、道路沿いを発火点とする。さらに、必要に応じて想定発火点を考え評価する。

上記に基づき、森林火災発生時のモデルを設定して評価する。具体的な評価指標と観点を表1に、評価に必要なデータを表2に示す。

表1 森林火災の評価指標及び評価の観点

評価指標	評価の観点
延焼速度[km/h]	・ 火災発生後、どの程度の時間で発電所に到達するのか ・ 発電所に到達し得る火災の規模はどの程度か ・ 必要となる消火活動の能力や防火帯の規模はどの程度か
火線強度[kW/m]	
火炎長[m]	
単位面積当たり熱量[kJ/m ²]	
火炎輻射強度[kW/m ²]	
火炎到達幅[m]	

表2 データ種類及び整備要領

データ種類	整備要領
土地利用データ	現地状況をできるだけ模擬するため、公開情報の中でも高い空間解像度である100mメッシュの土地利用データを用いる。 (国土数値情報 土地利用細分メッシュ)

植生データ	現地状況をできるだけ模擬するため、樹種や生育状況に関する情報を有する森林簿の空間データを現地の地方自治体より入手する。森林簿の情報を用いて、土地利用データにおける森林領域を、樹種・林齢によりさらに細分化する。
地形データ	現地の状況をできるだけ模擬するため、公開情報の中でも高い空間解像度である 10m メッシュの標高データを用いる。傾斜度、傾斜方向については標高データから計算する。 (基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュ)
気象データ	現地にて起こり得る最悪の条件を検討するため、発生件数の多い月の過去 10 年間の最大風速、最高気温、最小湿度の条件を採用する。

森林火災発生時の評価指標を設定したのち、輻射強度という指標を用いて評価対象に対してどの程度の熱影響があるかを評価する。火災影響評価の具体的な評価指標と内容を表 3 に示す。

表 3 火災影響評価の評価指標と内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m ²]	火災の炎から任意の位置にある点(受熱点)の輻射強度
火炎到達幅[m]	発電所に到達する火炎の横幅
形態係数[-]	火災と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	森林火災の火炎長より算出する値
危険距離[m]	延焼防止に必要な距離

森林火災モデルに対する評価対象設備との危険距離を評価し、想定する火災発生源と評価対象設備との実際の距離が危険距離より大きければ、森林火災による影響は無いといえる。

上記の評価指標は、受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。

森林火災の火炎形態については、土地の利用状況(森林、農地、居住地等の分布)、地形(標高、傾斜角度等)、気象条件(風向・風速、気温、湿度等)に大きく依存することから、これらをすべて反映した火炎モデル仮定することは難しい。したがって、森林火災の火炎は円筒火災をモデルとし、燃焼半径は火炎長の3分の1とする。なお、原子炉施設への火炎到達幅の分だけ円筒火災モデルが横一列に並ぶものとする。

評価に必要なデータを表 4 に示す。

表4 データ種類及び整備要領

データ種類	整備要領
火炎輻射発散度[W/m ²]	森林火災モデルの火炎輻射強度を変換したもの
火炎長[m]	森林火災モデルの火炎長
火炎到達幅[m]	森林火災モデルの到達火炎の横幅
危険輻射強度[W/m ²]	評価対象の輻射熱に対する耐熱性を輻射強度で示したもの

2.1.2 評価結果

コンクリートモジュールに対する評価については、「1F 森林火災の影響評価」に基づき評価結果を示す。

本評価においては、4種類（可燃物マップ、地形マップ、気象条件、発火点条件）の入力条件を用いて火災進展解析を行い、火災進展解析結果から設備の影響評価を行う。

①現地植生調査

入力条件の1つである可燃物マップは、発電所周辺の植生から求める。ただし、発電所構内及び防火帯近傍の植生に関しては正確に評価に反映するために現地植生調査を行う。

本評価においては、2019年7月16日から18日の3日間にかけて福島第一原子力発電所（以下、「1F」という。）敷地内及び防火帯周辺の植生状況を調査し、1F構内植生データを整備した。

②地形・植生・土地利用データの収集及びマップデータ整備

①で得られた発電所構内植生データ、発電所構外の土地利用データ（田、農用地、市街地、道路などの区分データ）、発電所構外の植生データ（森林部の詳細な樹種区分データ）を統合して、可燃物マップを作成する。また、標高から傾斜角、傾斜方向を計算し、地形マップを作成する。

本評価においては、1F構外の地形・植生・土地利用状況を評価に反映するため、国土交通省、環境省が公開しているデータを収集した。また、ArcGISを用いてこれらのデータを加工し、森林火災進展解析の入力となる地形マップ、可燃物マップを作成した。

③気象情報・火災件数の収集及び分析

森林火災が頻発する時期の気象条件のうち、最も厳しい条件（最大風速、最高気温、最小湿度）を、入力用の気象条件とする。また、このときの風向は卓越風向とし、風上に発火点条件を設定する。

本評価においては、全国及び福島県における森林火災発生件数を調査し、森林火災が多

発する 3～5 月を評価対象とした。1F 周辺における 3～5 月の気象データを調査し、森林火災進展解析の入力となる気象条件（気温，風速，風向及び湿度）及び発火点条件を設定した。

④火災進展評価

②，③で設定した 4 種類の入力条件を用いて，附属書 A において使用を推奨されている森林火災進展解析コード FARSITE により，火災が到達する時間，到達する火災の規模を評価する。FARSITE については参考資料－1（附属書 A より抜粋）を参照。

本評価においては，1F 周辺における森林火災進展解析を 14 ケース（ベースケース：10 ケース，感度解析：4 ケース）実施し，火災到達時間と火災規模指標を算出した。

⑤影響評価

④の火災進展評価により算出された指標を用いて，必要最小防火帯幅，危険距離，設備への熱影響等の評価する。

本評価においては，FARSITE 解析結果（火炎到達時間，火線強度，火炎長，延焼速度，単位面積当たり発熱量）を用いて，必要最小防火帯幅，危険距離，設備への熱影響等の評価した。

2.1.2.1 現地植生調査

森林火災影響評価の際，1F 周辺の土地利用状況及び植生状況を可燃物マップの形で表現する。可燃物マップの作成には，附属書 A に従い，公知の土地利用情報（土地利用状況データ，植生調査データ，森林簿等）を利用する。ただし，1F 構内においては公知の土地利用情報から最新情報を得ることが困難である。

よって，評価の精度及び説明性向上の観点から，1F 構内及び防火帯周辺の現地植生調査を実施した。現地植生調査の際は，2 級造園施工管理技士の有資格者が随行し，樹種・林齢・樹高・下草丈の判定を行った。

(1) 現地植生調査計画

1F 構内の植生領域は，2019 年 2 月撮影の航空写真（図 1 参照）から，図 2 に示すように読み取ることが可能である。航空写真から読み取った植生領域を，1F 南側エリア，西側エリア，北側エリアの 3 エリアに分け，エリアごとに調査範囲を選定した。調査範囲の選定の際には，1F 敷地の森林簿（参考文献[1]）を参考とした。

各エリアにおける調査範囲の選定理由を以下に詳述する。

1F 南側エリア（調査地点 No. 1～4）

1F 南側エリアにおける調査範囲を図 3 に示す。1F 南側エリアは，防火帯近傍に比較的

多くの植生が見られることが読み取れる。

図4に示した森林簿情報（参考文献[1]）より、図3中の1F構内植生領域は、クロマツ林、アカマツ林及び雑草地が混在する領域と推定される。このことを踏まえ、本計画では下記の調査地点を選定した。

- ・調査地点 No. 1～4：1F 南側の植生を万遍なく調査できる地点。

1F 西側エリア（調査地点 No. 5～7, No. 18～19）

1F 西側エリアにおける調査範囲を図5に示す。1F 西側エリアでは南側エリア及び北側エリアに比べて、防火帯近傍の植生は少ないことが読み取れる。

図6に示した森林簿情報（参考文献[1]）では、航空写真上で植生が確認される領域はアカマツ林が大半であるが、植生不明の領域も含まれる。加えて、散見される構内街路樹については森林簿情報が無い。このことを踏まえ、本計画では下記の調査地点を選定した。

- ・調査地点 No. 5～7：森林簿で「不明」となっているエリアをカバーする地点
- ・調査地点 No. 18～19：街路樹が多く見られるエリアから代表的な2点を選択

1F 北側エリア（調査地点 No. 8～17, No. 20～21）

1F 北側エリアにおける調査範囲を図7に示す。北側エリアは、南側、西側エリアに比べて広く、植生の分布する領域も多い。反面、整地区画や建造物など、植生が無い領域も広く存在していることが読み取れる。また、図8に示した森林簿情報（参考文献[1]）より、1F 北側エリアでは、森林簿データが無い領域（例：調査地点 13, 14 周辺）が存在することがわかる。

このことを踏まえ、下記の調査地点を選択した。

- ・調査地点 No. 8, 16, 17：防火帯近傍で植生の多い領域を広く調査可能な地点
- ・調査地点 No. 13～15, 20～21¹⁾：森林簿データが無いエリアをカバーする地点
- ・調査地点 No. 10, 12：森林簿で「不明」となっているエリアをカバーする地点
- ・調査地点 No. 9, 11：伐採木の保管が推測されるエリアをカバーする地点

現地植生調査においては、調査地点周辺の植生の樹種・林齢・樹高・下草丈を調査する。伐採木の保管領域と推測されるエリア（調査地点 No. 9, 11 周辺）については、伐採木の堆積高さを確認する。また、1F 風上²⁾に位置し防火帯幅の評価に大きく影響しうる調査地点 No. 8 周辺については、重点的に調査を実施した。

1)防火帯位置の設定によっては、解析評価に使用する必要が生じるため選定した。

なお、防火帯位置が建屋から遠い場合は防火帯内側となり、解析評価で考慮されない領域となる。

2)今回評価では西～西北西の風を想定する。



图1 1F周边航空写真（2019年2月撮影）

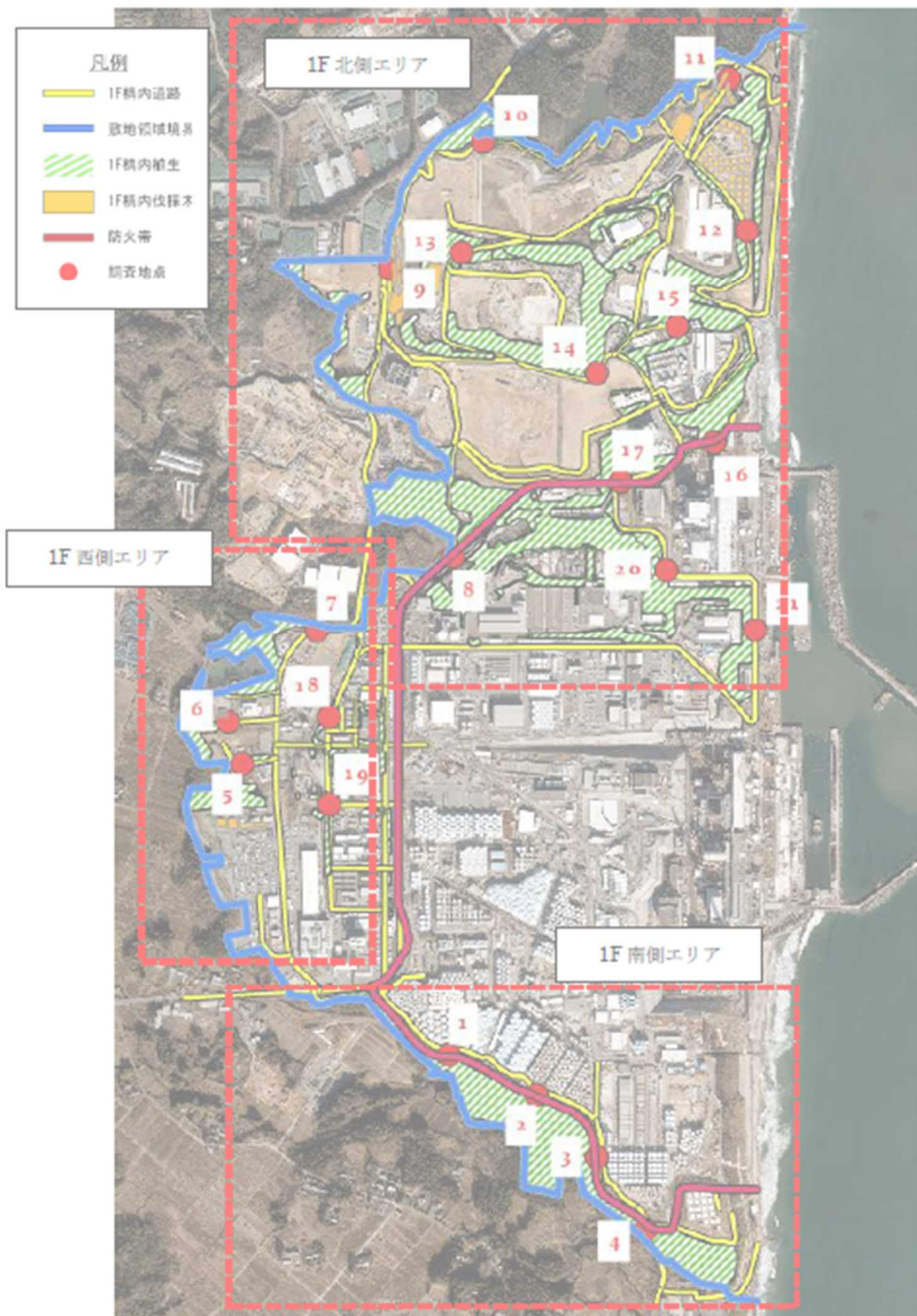


図2 1F 構内の植生分布



図3 1F南側エリアにおける調査範囲

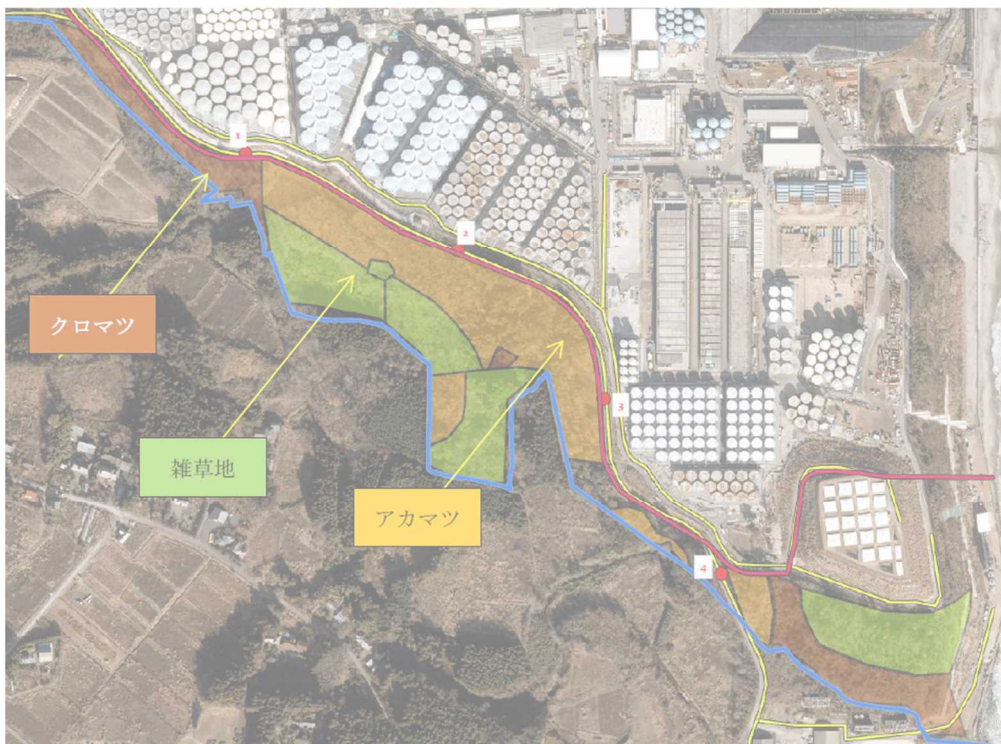


図4 1F南側エリアにおける森林簿情報

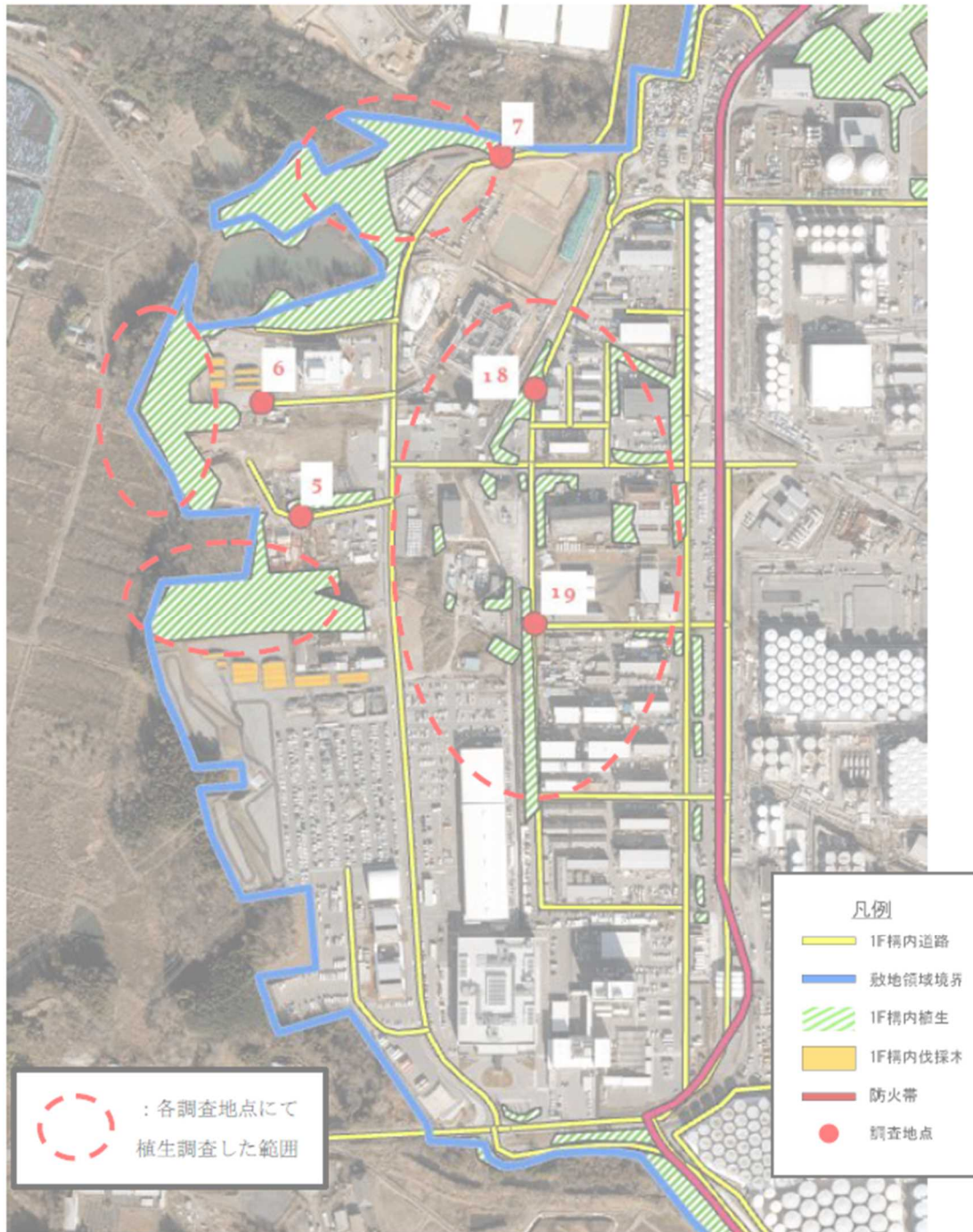


図5 1F西側エリアにおける調査範囲

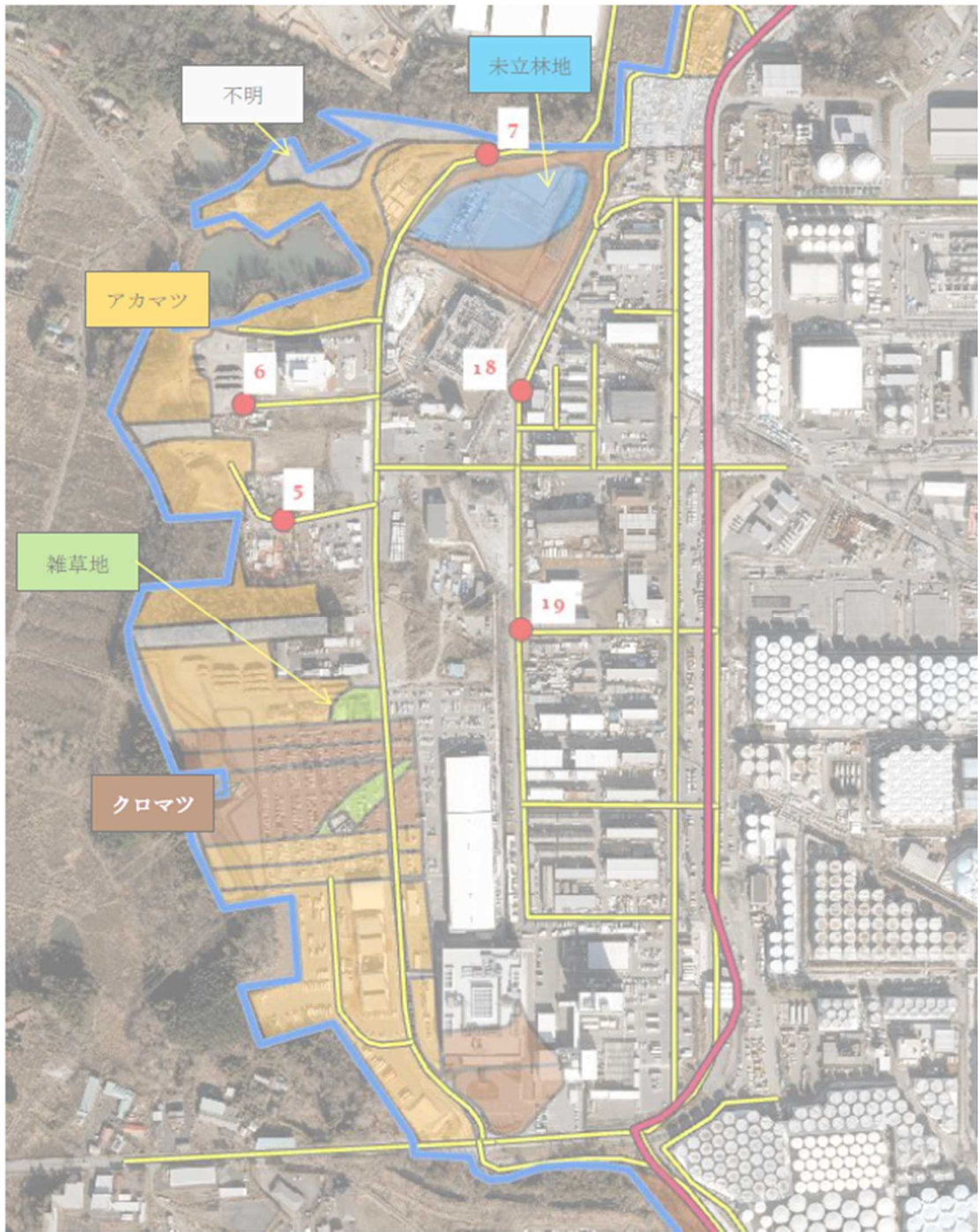


図6 1F西側エリアにおける森林簿情報



図7 1F北側エリアにおける調査範囲



図8 1F北側エリアにおける森林簿情報

(2) 現地植生調査結果

前項に前述した調査地点において、2019年7月16日から18日の3日間にわたり現地植生調査を実施した。

現地植生調査の際は、2級造園施工管理技士の有資格者が随行し、樹種・林齢・樹高・下草丈の判定を行った。各調査地点における植生（樹種・樹高・林齢・下草丈）の調査結果を表5～表9に示す。

現地植生調査にて確認した植生区分は、可燃物モデルの設定（FARSITEへ入力する可燃物の区分）を考慮し、以下の9区分に分類した。現地植生調査から得られた、1F構内及び防火帯近傍における9区分の植生分布を図9に示す。

- ・アカマツ 10年生以上
- ・クロマツ 10年生以上
- ・サクラ（街路樹）
- ・スギ 10年生以上
- ・マツ 10年生未満
- ・広葉樹（雑木）
- ・竹林
- ・草地
- ・伐採木¹⁾

1)構内に保管されている伐採木については、伐採木の堆積高さが平均4m程度であることを確認した。



図9 現地植生調査結果概要（1F敷地内及び防火帯近傍の植生区分）

表5 1F南側における現地植生調査結果（調査地点No.1～4）

調査地点 No.	森林簿情報	調査項目		
		樹種	樹高・林齢	下草丈
1	アカマツ林 クロマツ林	杉が主要植生となっていた。正門付近は広葉樹（サクラやクヌギ等）が見られた。	樹高：10m～30m 林齢：30年程度	約1～2m
2	アカマツ林 +雑草地	広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂して主要植生となっていた。道路脇には草地も見られた。	樹高：約25m 林齢：約20～30年	約0.5～1m
3	アカマツ林	スギ、クロマツがそれぞれ主要植生となった領域に分かれていた。道路間には草地も見られた。	樹高：スギ・クロマツは30m程度 林齢：スギは40～50年、クロマツは10～20年	約0.5～1m
4	アカマツ林 +雑草地	広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂し、主要植生となっていた。伐採木貯留槽付近は、10年生未満の実生マツが広範囲に分布していた。	樹高：広葉樹は約10m、実生マツは1～2m程度 林齢：広葉樹は約10～40年、実生マツは10年未満	約1～3m （ササが点在）

表6 1F西側における現地植生調査結果（調査地点 No. 5～7, No. 18～19）

調査地点 No.	森林簿情報	調査項目		
		樹種	樹高・林齢	下草丈
5	アカマツ林 (一部不明)	アカマツは半数近くが枯れ、代わりに広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂して主要植生となっていた。	樹高：約 20m 林齢：約 10 年	約 0.5～1m
6	アカマツ林 (一部不明)	広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂して主要植生となっていた。	樹高：約 25～30m 林齢：約 20～25 年	約 2～3m (ササ)
7	アカマツ林 (一部不明)	1F 敷地内は、広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂して主要植生となっていた。 1F 敷地外は、草地、アカマツ林及び、建造物（中間貯蔵施設仮置き場と推測される）の存在が確認された。	樹高：広葉樹は約 10m, 敷地外のアカマツは約 20m 林齢：広葉樹は約 10 年, 1F 敷地外のアカマツは 20～25 年	約 1m 1F 敷地外 草地は 1.5 ～2m。
18	森林簿データ なし (街路樹)	代表2地点で調査を実施し、街路樹はほぼ全てサクラであることを確認した。	樹高：約 5m 林齢：約 40 年	約 50cm
19	森林簿データ なし (街路樹)			

表7 1F 北側における現地植生調査結果（調査地点 No. 8～11）

調査地点 No.	森林簿情報	調査項目		
		樹種	樹高・林齢	下草丈
8	アカマツ林 (伐採木)	1F 敷地内は、広葉樹（サクラやクヌギ等）が繁茂して主要植生となっていた。一部、竹林と、伐採木の仮保管場（堆積高さは約3m）も確認された。1F 敷地外は、草地及び、クロマツ林の存在が確認された。	樹高： 広葉樹，1F 敷地外のクロマツともに，約 10～20m 林齢：広葉樹は約 10 年，1F 敷地外のクロマツは約 30～40 年	約 1～2m
9	クロマツ林 (伐採木)	樹木がほぼ見られず，伐採木の仮保管場となっていた（堆積高さは約 3m）。	—	—
10	クロマツ林 (一部不明)	道路沿いはクヌギ，道路から北側に離れた林はアカマツ林となっていた。	樹高：クヌギは約 6m，アカマツは約 30m 林齢：クヌギは約 10 年，アカマツは約 40 年	約 1～1.5m
11	クロマツ林 (伐採木)	アカマツが主要植生となっていた。 伐採木の仮保管場もあり，堆積高さは約 4m であった。	樹高：約 20m 林齢：約 50 年	約 1m

表 8 1F 北側における現地植生調査結果 (調査地点 No. 12~14)

調査地点 No.	森林簿情報	調査項目		
		樹種	樹高・林齢	下草丈
12	不明 (森林簿データなし)	広葉樹(クヌギ)と草が繁茂していた。海岸側の植生は樹齢の若い実生マツが主要植生と見られる。	樹高:クヌギは約6~7m, 実生マツは樹冠部のみ確認のため不明 林齢:クヌギ, 実生マツともに10年未満	約1~1.5m
13	森林簿データなし	クロマツ, アカマツが主要植生となっていた。伐採木の仮保管場もあり, 堆積高さは約5mであった。	樹高:クロマツ, アカマツともに約6m 林齢:クロマツ, アカマツともに約15~20年	約2m
14	森林簿データなし (一部はアカマツ)	クロマツ, アカマツが主要植生となっていた。調査地点の南側は広範囲で造成され, 植生の無い領域となっていた。	樹高:クロマツは約15~20m, アカマツは約8m 林齢:クロマツは約30年, アカマツは約10~16年	約1~2m

表9 1F北側における現地植生調査結果（調査地点No.15～17, 20～21）

調査地点 No.	森林簿情報	調査項目		
		樹種	樹高・林齢	下草丈
15	クロマツ林 (一部不明)	広葉樹(サクラやクヌギ)が繁茂して主要植生となっていた。道路沿いには一部クロマツも見られた。	樹高: 広葉樹は約10m, クロマツは約15~20m 林齢: 広葉樹は幅広い 林齢が混在しており, クロマツは約30年	約1~2m
16	クロマツ林 (一部不明)	広葉樹(サカキ等), 枯木を含むクロマツ, 竹林が主要植生となっていた。	樹高: 広葉樹, クロマツ ともに約5~6m 林齢: 広葉樹, クロマツ ともに約10年	約2m (竹林は約 2~3m)
17	アカマツ林 クロマツ林	クロマツ, アカマツが主要植生となっていた。	樹高: クロマツ, アカマツ ともに約25m 林齢: クロマツは約30年, アカマツは約20年	約1.5~2m
20	森林簿データ なし	広葉樹(ミズナラ, クヌギ等)が主要植生となっていた。	樹高: 約5m 林齢: 約10年	約0.5~1m
21	森林簿データ なし	樹齢の若いマツ(実生マツと推定される)が一様に分布していた。	樹高: 約1m 林齢: 約10年未満	約0.5m

2.1.2.2 地形・植生・土地利用データの収集及びマップデータ整備

森林火災影響評価においては地形マップ及び可燃物マップを入力として用いる。本評価で使用する火災進展解析コード FARSITE の場合は、下記に示す 3 種類の地形マップと、5 種類の可燃物マップを入力する。これらのマップデータはすべてラスター（メッシュ）のデータ形式となっている。

地形マップ

- ・ 標高マップデータ (Elevation)
- ・ 傾斜角マップデータ (Slope)
- ・ 傾斜方向マップデータ (Aspect)

可燃物マップ

- ・ 可燃物マップデータ (Fuel Model)
- ・ 樹冠率マップデータ (Canopy Cover)
- ・ 樹高マップデータ (Stand Height)
- ・ 枝下高さマップデータ (Canopy Base Height)
- ・ 樹冠かさ密度マップデータ (Canopy Bulk Density)

なお、樹冠率、樹高、枝下高さ及び樹冠かさ密度は、樹冠部（樹木の枝葉部分）を表すパラメータである。意味を下記に示す。

- ・ 樹冠率：上空から森林を見た場合の、平面上の樹冠が占める割合（参考文献[2]）。
FARSITE においては、デフォルトとして設定されている 4 区分か、%単位で入力する。
- ・ 樹高：樹木の高さ[m]。
- ・ 枝下高さ：地表から樹冠までの長さ[m]。
- ・ 樹冠かさ密度：樹冠部に存在する枝葉のかさ密度 [kg/m³]。

上記の 3 種類の地形マップと 5 種類の可燃物マップは、附属書 A に従い以下に示す地形・植生・土地利用の空間データを収集して作成した。

- ・ 地形データ：基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュデータ（参考文献[3]）
- ・ 植生データ：環境省 自然環境保全基礎調査 植生調査データ（参考文献[4]）
1F 構内植生分布
- ・ 土地利用データ：国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ（参考文献[5]）

(1) 地形データ

地形データについては、国土交通省 国土地理院発行の「基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュデータ (2016 年度版, 参考文献[3])」を基に、地形マップ (標高, 傾斜方向, 傾斜角) を作成する。

図 1 0 に本解析評価に使用する数値標高モデル 10m メッシュデータを示す。

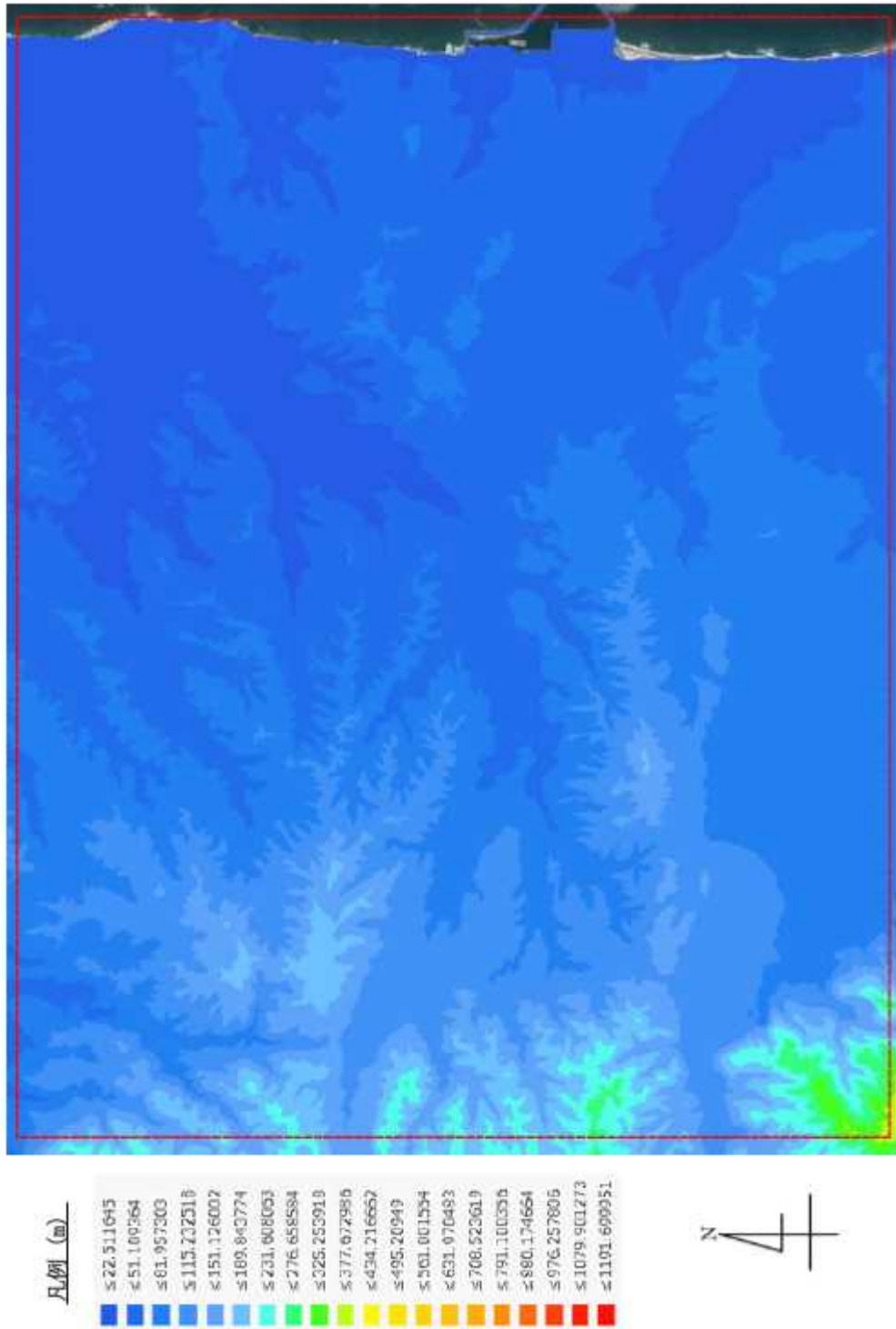


図 10 基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュデータ

(2) 植生データ

植生データについては、環境省 自然環境局生物多様性センターが実施した「自然環境保全基礎調査 植生調査（参考文献[4]）」の結果を用いる。

附属書Aにおいて、「森林簿の情報をを用いて、土地利用データにおける森林領域を、樹種・林齢によりさらに細分化する」ことが推奨されている。しかし、1Fサイト構外においては森林簿が入手できなかったため、「柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 外部火災影響評価について（以下、「Kサイト評価（参考文献[6]）」という。）」を参考に環境省の植生データ（参考文献[4]）を使用して、土地利用データ上で「森林」区分となっている領域を細分化する。

なお、1F近傍の植生については、現地植生調査結果を反映して可燃物マップを作成する。

図1-1に本解析評価にて使用する植生調査データを示す。



図 1 1 自然環境保全基礎調査 植生調査データ

(3) 土地利用データ

土地利用データについては、国土交通省 国土政策局発行の「国土数値情報 土地利用細分メッシュ（2016 年度調査版，参考文献[5]）」を用いる。図 1 2 に本解析評価にて使用する土地利用データを示す。土地利用データのうち「森林」区分については，図 1 1 の植生データによって細分化する。

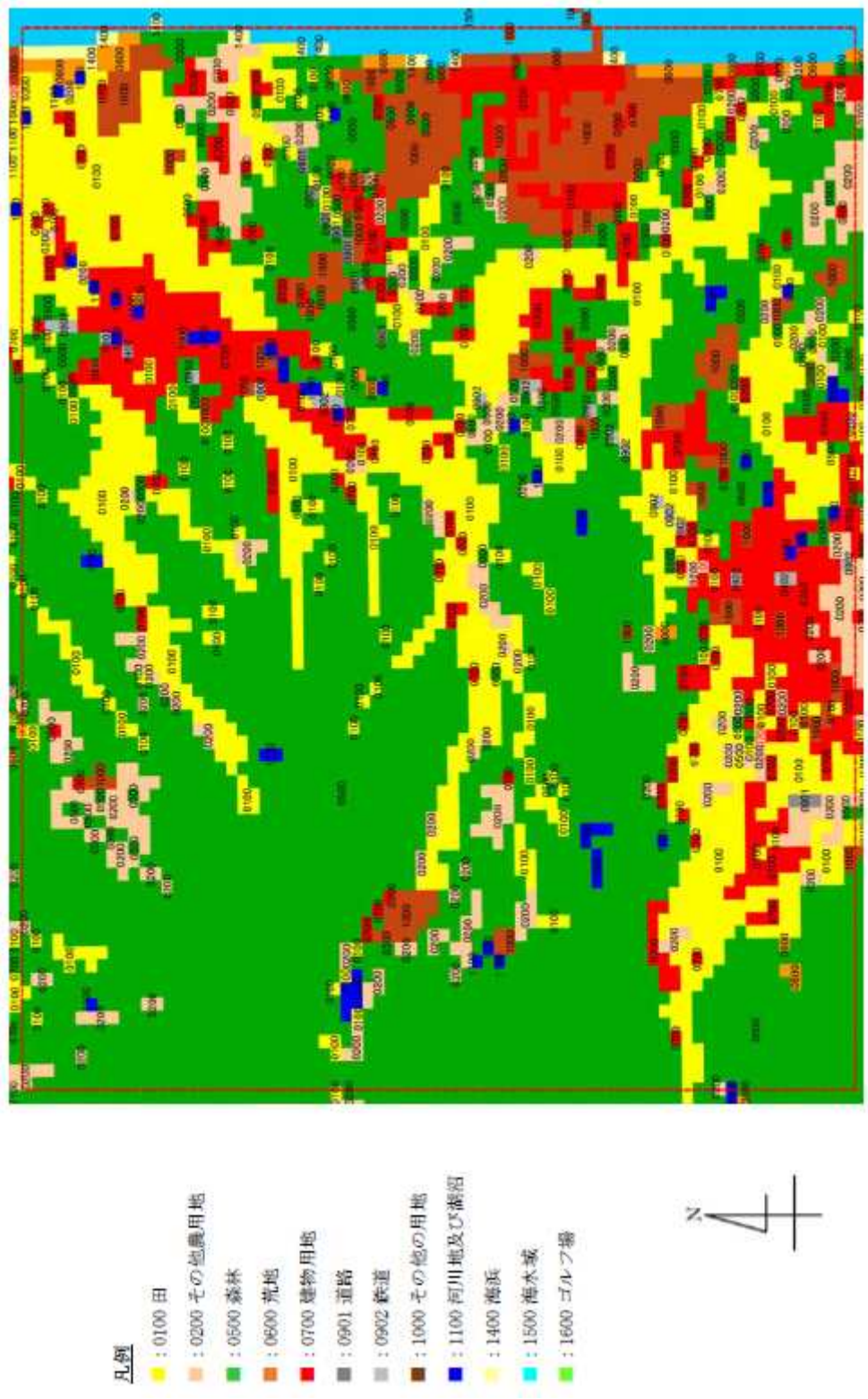


図 1 2 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ

(4) 地形マップの作成

森林火災進展解析コード FARSITE に入力する地形マップは、以下の 3 種類である。

- 標高マップデータ (Elevation)
- 傾斜角マップデータ (Slope)
- 傾斜方向マップデータ (Aspect)

上記のうち、標高マップデータは図 1 0 に示した基盤地図情報データ (参考文献[3]) を使用する。他の 2 つは附属書 A に従い、標高マップデータから算出する。この算出には、地理情報解析ソフト ArcGIS を使用した。

ArcGIS を用いて算出した傾斜角マップデータを図 1 3 に、傾斜方位マップデータを図 1 4 にそれぞれ示す。

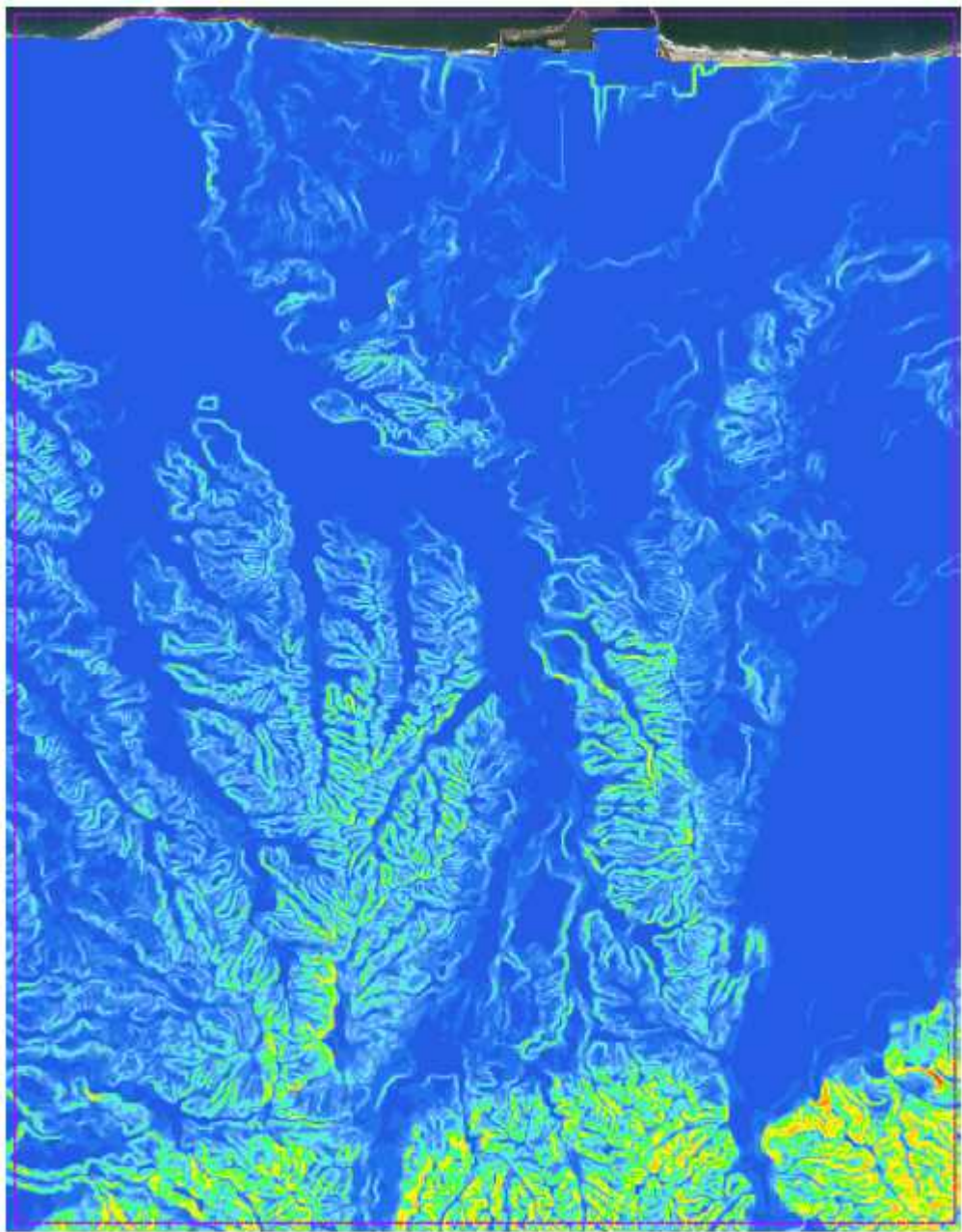
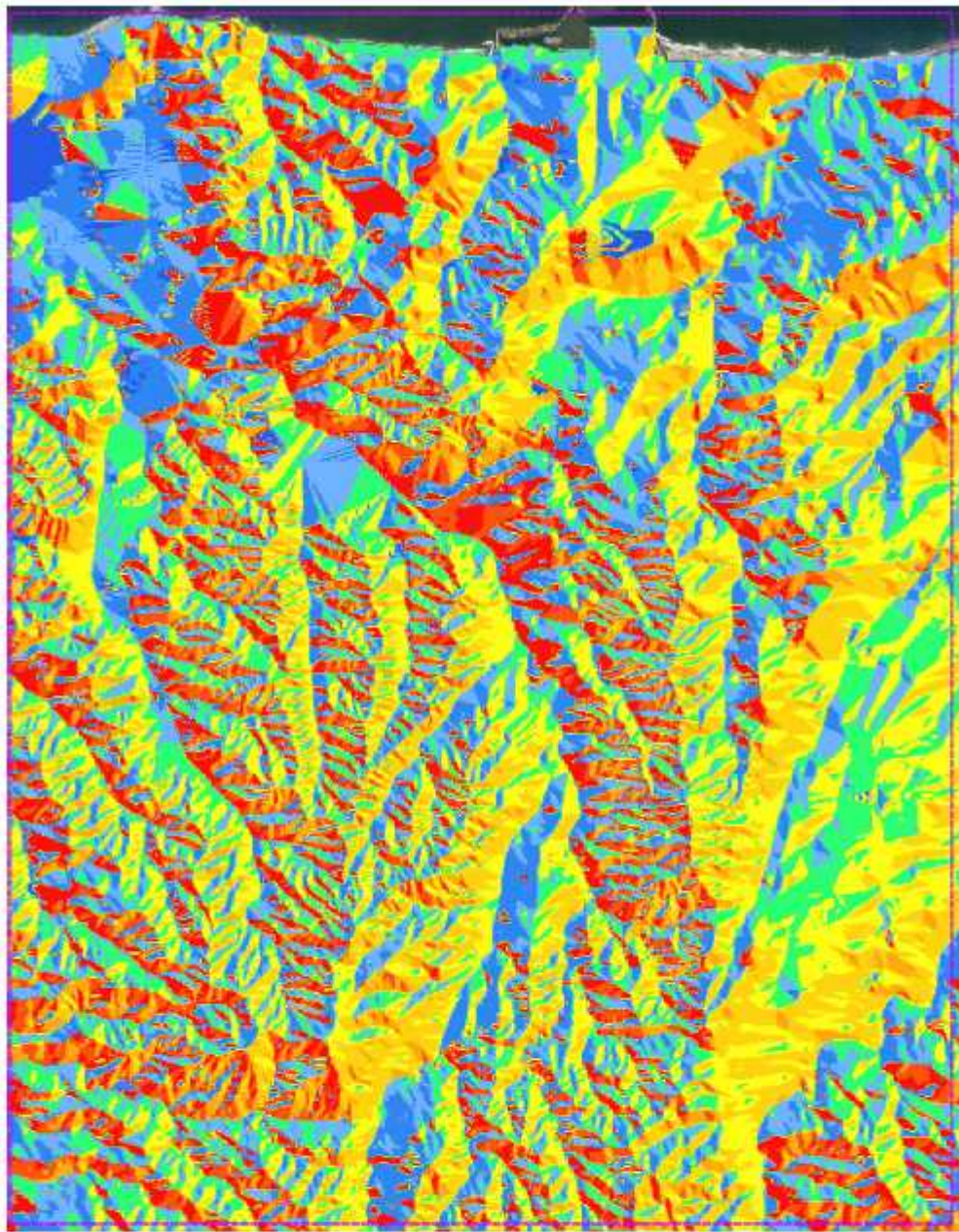


図 1-3 傾斜角マップデータ



- 凡例
- : 北方向
 - : 北東方向
 - : 東方向
 - : 南東方向
 - : 南方向
 - : 南西方向
 - : 西方向
 - : 北西方向



図 1 4 傾斜方位マップデータ

(5) 可燃物マップの作成

森林火災進展評価に用いる FARSITE の入力である可燃物マップは、以下の 5 種類である。これらはすべてラスターデータ（メッシュデータ）の形式となっている。

- ・可燃物マップデータ (Fuel Model)
- ・樹冠率マップデータ (Canopy Cover)
- ・樹高マップデータ (Stand Height)
- ・枝下高さマップデータ (Canopy Base Height)
- ・樹冠かさ密度マップデータ (Canopy Bulk Density)

上記のうち、可燃物マップデータは植生データ、土地利用データ、現地植生調査結果を ArcGIS を用いてすべて統合して作成する。他 4 つのマップデータは、すべて樹木の樹冠部に関するデータであり、可燃物マップ上のデータに基づいて設定する。

まず、植生データ・土地利用データ・現地植生調査結果を統合する。統合した植生の分布を図 1 5 に示す。このとき、除草を実施して管理する領域（図 1 6 参照）及び中間貯蔵施設（図 1 7 参照）を統合した植生に反映する。

次に、統合した植生に応じて各メッシュに FARSITE 可燃物モデル（植生に応じて FARSITE に入力される草地、中低木、倒木といった可燃物の区分、以下「可燃物モデル」という）を設定する。設定した可燃物モデルの分布を図 1 8 に、使用した可燃物モデル一覧を表 1 0～表 1 1 にそれぞれ示す。このとき、保守側の想定として、図 1 5 の植生データに対して可燃物の存在量を多く想定した可燃物モデルを設定する（表 1 2～表 1 5 参照）。

さらに、設定した可燃物モデルに応じ、樹冠データ（樹冠率・樹高・枝下高さ・樹冠かさ密度）を設定する。樹冠データについては、データを正確に調査することが困難であるため、一律に以下の値を使用した。4 種類の樹冠データ分布を図 1 9～図 2 2 に示す。

・樹冠率：区分 3

（FARSITE デフォルトで設定されている 4 区分のうち、保守側の想定として、一般的な森林である区分 3 を一律で使用。なお、区分 1 と 2 は非森林を含む領域であり、区分 4 は原生林のように植生が密な想定のため、地表近くの風が植生に遮られて弱まり、火災規模が小さくなる。）

- ・樹高：15m（FARSITE デフォルト値を一律で使用）
- ・枝下高さ：4m（FARSITE デフォルト値を一律で使用）
- ・樹冠かさ密度：0.2 kg/m³（FARSITE デフォルト値を一律で使用）

図は最新の情報に合わせ評価中

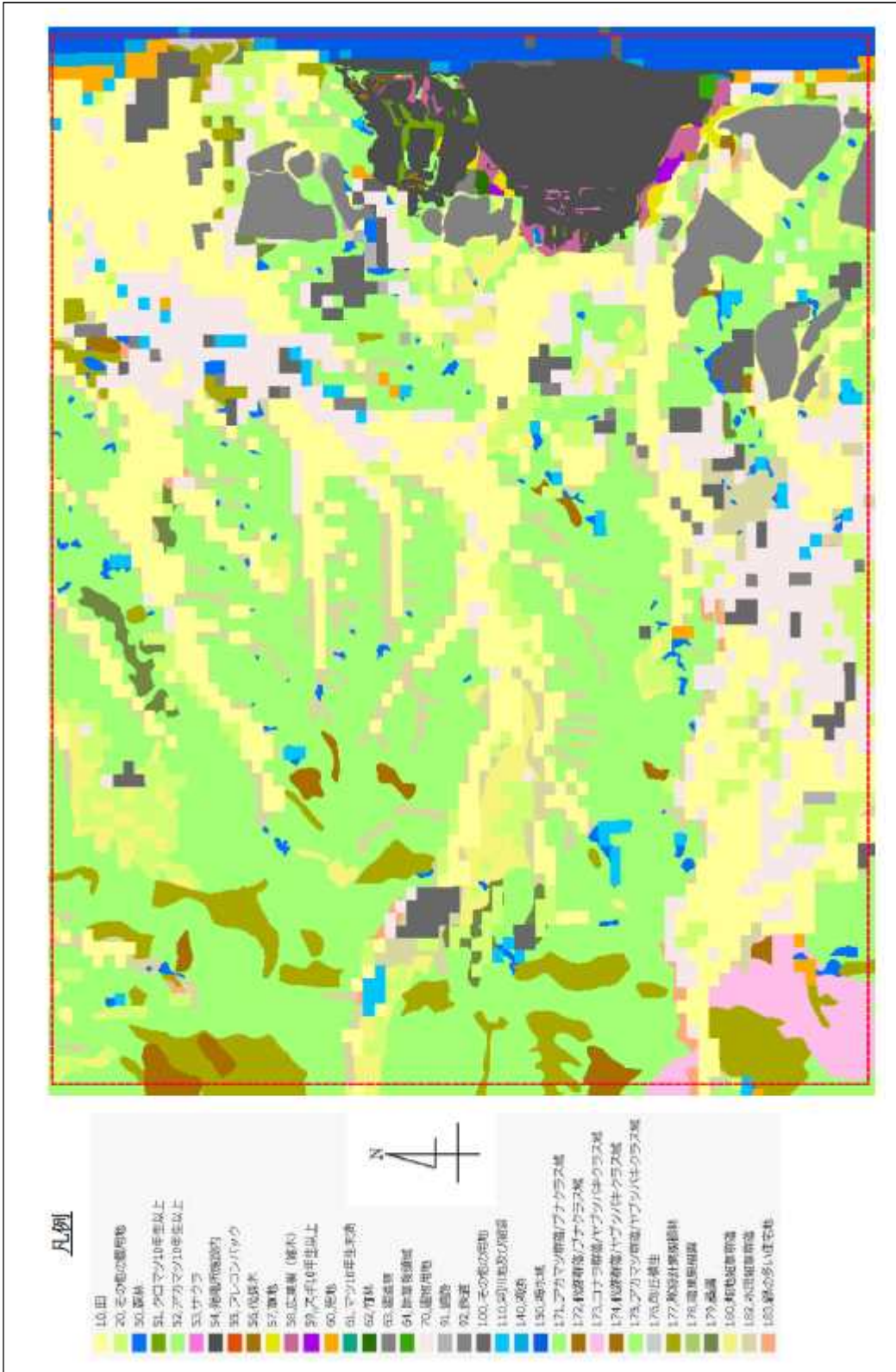


図15 植生データ・土地利用データ・現地植生調査結果を統合した1F周辺植生マップ

伐採木貯留槽周辺は、現地植生調査結果より10年生未満の実生マツが分布する。10年生未満のマツは火線強度が大きくなることが予想されるため、当該領域においては除草を実施し、燃えやすい植生が繁茂しないよう管理したものと仮定する。除草後の領域については、刈り残しや新たな雑草の繁茂を考慮して、可燃物モデルNo.1「丈の低い草地」に区分する。



図16 除草を実施する範囲について

1F 周辺においては除染廃棄物の中間貯蔵施設の整備が進行中である（参考文献[7]）。中間貯蔵施設の整備により，広範囲にわたって土地が整地され，植生の無い領域が広がると考えられる。

これを踏まえ，本解析評価においては，2019 年 8 月時点における最新公開情報（参考文献[7]）をベースに，整地が完了した領域（下図矢印のさす領域，参考文献[7]中に整備状況の記載あり）を非植生領域として可燃物マップに反映することとした。

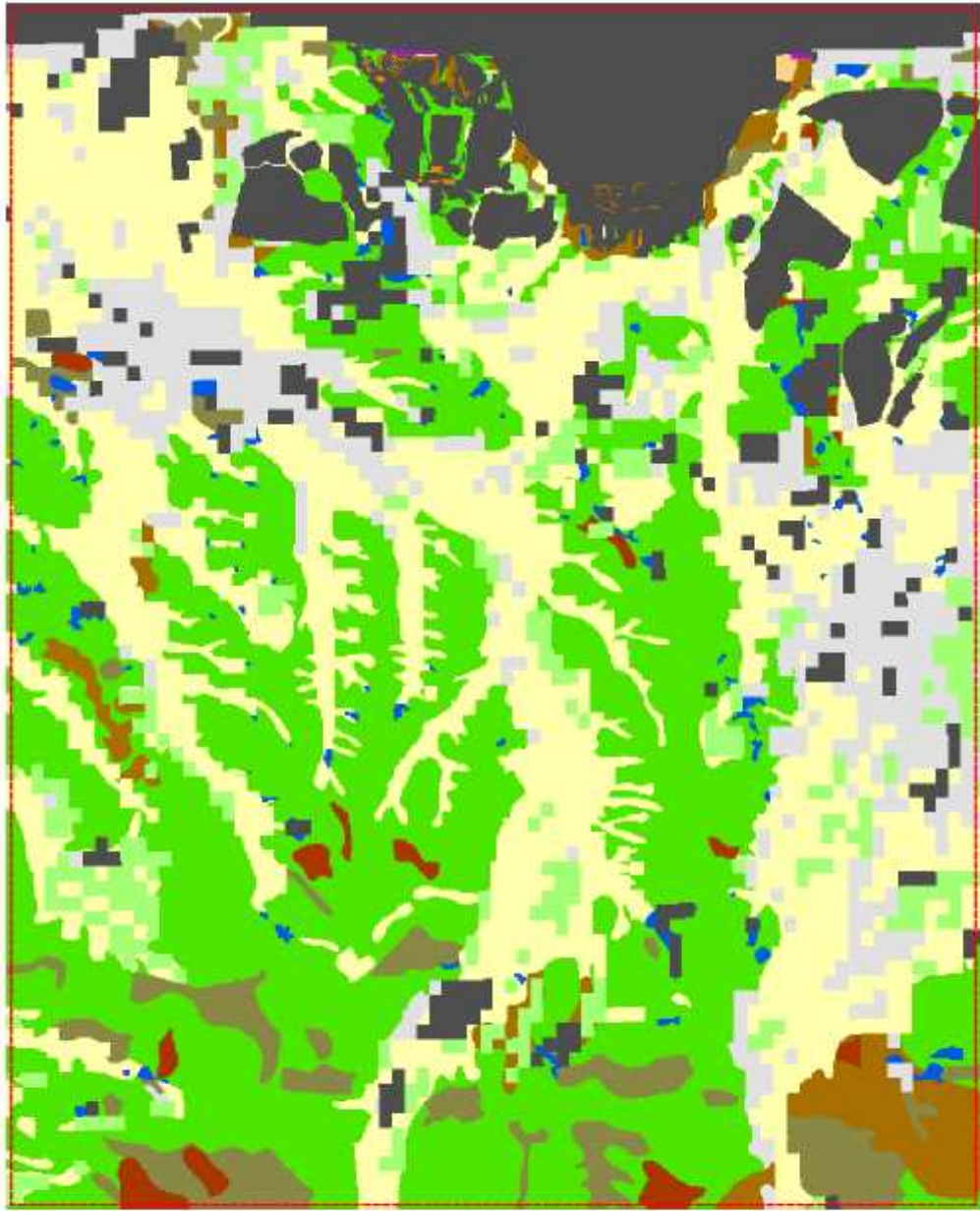


< 出典 > 中間貯蔵施設環境安全委員会第 15 回会合

資料 1 「中間貯蔵施設事業の状況について（2019 年 8 月）」2 ページ（参考文献[7]）

図 1 7 中間貯蔵施設の反映について

図は最新の情報に合わせ評価中



凡例

- : 除草後領域
- : 丈の高い草場
- : 低木の茂み
- : 茂み
- : 森林
- : 樹木
- : スギ 10 年生
- : マツ 10 年生未満
- : マツ 10 年生
- : 落葉広葉樹
- : 非植生領域
- : 伐採木

※太字+下線部の領域は
樹木が存在。

※「除草後領域」の詳細は、
3.3-26 ページの備考参照



図18 IF 周辺の可燃物マップ

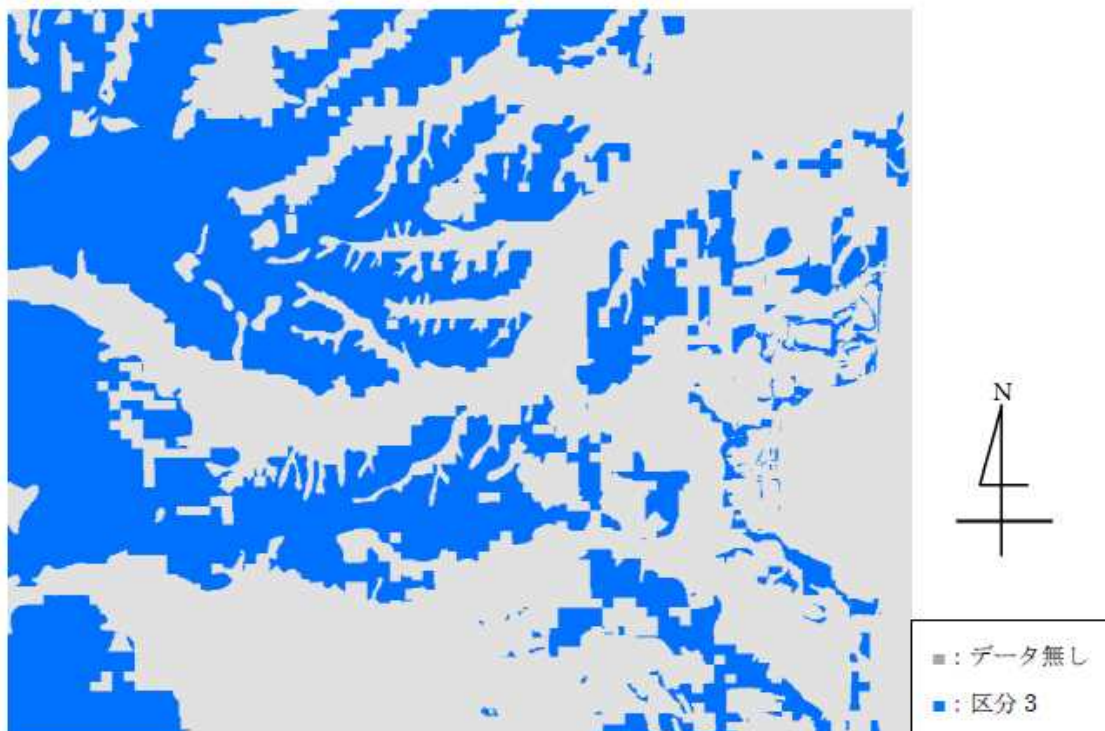


図19 樹冠率マップ

図は最新の情報に合わせ評価中

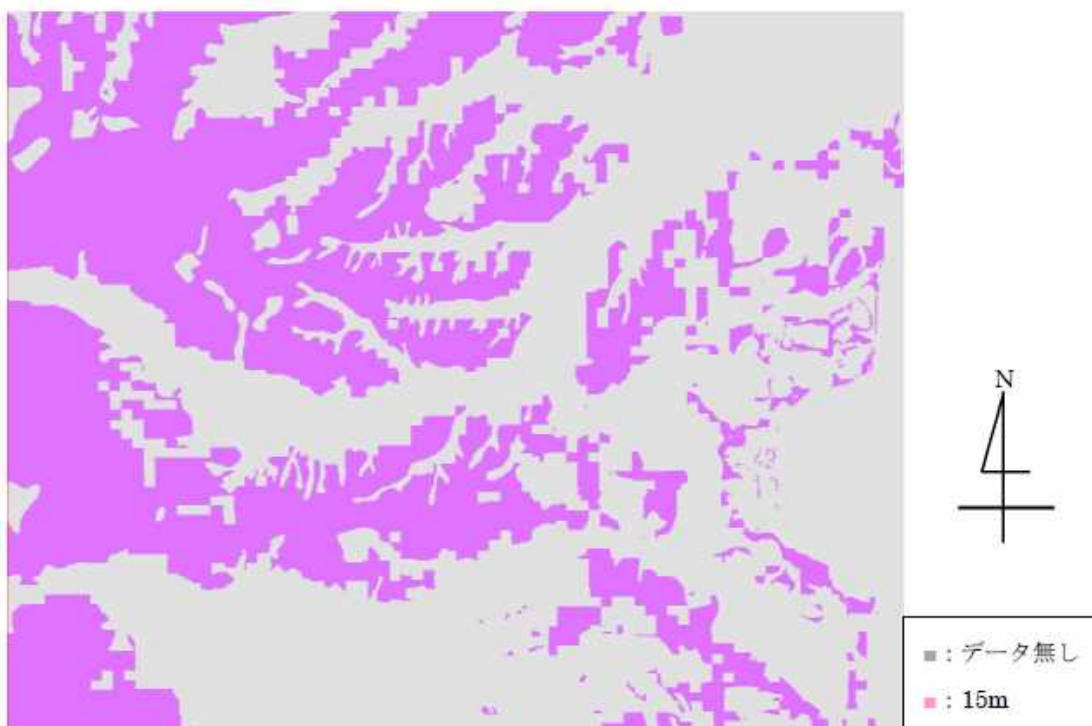


図20 樹高マップ

図は最新の情報に合わせ評価中



図 2 1 枝下高さマップ

図は最新の情報に合わせ評価中



図 2 2 樹冠かさ密度マップ

図は最新の情報に合わせ評価中

表 1 0 本解析評価で使用する可燃物モデル概要 (FARSITE デフォルト)

可燃物 モデル No.	種類	植生の特徴	燃え方の特徴
1	Short Grass 丈の低い草地	30cm 程度の丈の草が一様に広がった草原。	FARSITE デフォルトの草地の可燃物モデル (No. 1~3) 中では最も火線強度が小さいモデル。但し延焼速度は大きく、火が広がりやすい (参考文献[5])。
3	Tall Grass 丈の高い草地	1/3 以上が乾燥した状態の、丈の平均が 1m 程度の草原。	FARSITE デフォルトの草地の可燃物モデル (No. 1~3) 中では最も火線強度が大きくなる保守的なモデル (参考文献[5])。
4	Chaparral 低木の茂み	丈が約 1.8m あるいはそれ以上の低木に覆われ、燃えやすい枝葉が多く積み上がっている土地。	極小径 (約 6mm 以下) で発火しやすい枝や葉などの可燃物量が大きく、かつ可燃物堆積高さが大きいいため、火線強度が非常に大きくなる保守的なモデル (参考文献[5])。
5	Brush 茂み	低木に覆われているが下草が少ない土地、あるいは、若く含水量の大きい低木に覆われた土地。	可燃物全体に占める生体可燃物量 (含水量が多い) の割合が高く、火線強度は大きくなりにくいモデル (参考文献[5])。
10	Timber litter /Understory リターと低木	一般的な森林。	FARSITE デフォルトの森林の可燃物モデル (No. 8~10) の中では最も可燃物堆積高さが大きく、火線強度は大きくなる。一般的な「森林」はこのモデルで表現できる (参考文献[5])。
13	Heavy Slash 倒木	切り倒された森林、あるいは倒木が多い土地。	面積あたりの可燃物量は No. 1~13 のモデル中最大。火は広がりやすいが、火線強度はゆっくり上昇する (参考文献[5])。

表 1 1 本解析評価で使用する可燃物モデル概要 (カスタム可燃物モデルとして設定)

可燃物モデル No.	種類	植生の特徴	燃え方の特徴
15	スギ 10 年生	10 年生のスギ林。下草丈は 1.8m 程度を想定。	JNES-RC-Report (参考文献[8]) で使用されていた可燃物モデル。スギ 20 年生以上の可燃物モデルに比べて生体可燃物量が少ない。
19	マツ 10 年生未満	10 年生未満のマツが一様に分布した植生。下草丈は 1.8m 程度を想定。	JNES-RC-Report (参考文献[8]) で使用されていた可燃物モデル。マツの可燃物モデル (No. 19 ~23) 中で最も生体可燃物量が少ないため、火線強度が大きくなりやすい。
20	マツ 10 年生	10 年生のマツ林。下草丈は 1.8m 程度を想定。	JNES-RC-Report (参考文献[8]) で使用されていた可燃物モデル。生体可燃物量が可燃物モデル No. 19 に比べて大きいため、湿分量が多くなり火線強度は小さくなる。他パラメータは全て No. 19 と同じ。
24	落葉広葉樹	平均的な落葉広葉樹林。下草丈は 1.8m 程度を想定。	JNES-RC-Report (参考文献[8]) で使用されていた可燃物モデル。No. 15 や No. 20 に比べて生体可燃物量が大きい。
81	伐採木	伐採木を平均 4m 程度の高さに積み上げて保管している領域。	可燃物モデル No. 13 の可燃物堆積高さと同面積当たり可燃物量を、 $4\text{m} \div 90\text{cm} = 4.4$ 倍に修正した可燃物モデル。詳細は添付資料 4 参照。 (4m: 伐採木積上げ高さ, 90cm: 可燃物モデル No. 13 の堆積高さ)

表 1 2 植生に応じた可燃物モデルの設定方法（土地利用データ）

データ区分	可燃物モデル	設定根拠
田	No. 3 Tall Grass (丈の高い草地)	K サイト評価（参考文献[6]）の想定を踏襲し可燃物モデル No. 3 でモデル化する。
その他の農用地	No. 4 Chaparral (低木の茂み)	「その他の農用地」には果樹園など低木の多い農地も含まれることから、K サイト評価（参考文献[6]）の想定を踏襲し可燃物モデル No. 4 でモデル化する。
荒地	No. 5 Brush (茂み)	植生が少ない領域と考えられるが、K サイト評価（参考文献[6]）の想定を踏襲し保守側に可燃物モデル No. 5 でモデル化する。
建物用地		
森林	No. 10 Timber litter / Understory (リターと低木)	環境省の植生調査データが無く、国土交通省の土地利用データで「森林」区分となっている領域は、FARSITE デフォルトの森林の可燃物モデル No. 8～10 中で最も保守性の高い No. 10 でモデル化する（K サイト評価（参考文献[6]）の想定を踏襲）。
道路	No. 99 非植生領域	道路、鉄道、水域などは樹木等が無いと考えられるため、K サイト評価（参考文献[6]）の想定を踏襲し非植生領域とする。
鉄道		
その他の用地		
河川地及び湖沼		
海浜		
海水域		

表 1 3 植生に応じた可燃物モデルの設定方法 (植生データ) (1/2)

データ区分	可燃物モデル	設定根拠
畑地雑草群落	No. 3 Tall Grass (丈の高い草地)	雑草群落や牧草地等は草地と想定できることから, FARSITE デフォルトの草地の可燃物モデル No. 1~3 中で, 最も保守性の高い No. 3 でモデル化する。
牧草地, ゴルフ場		
水田雑草群落		
落葉果樹園	No. 4 Chaparral (低木の茂み)	K サイト評価 (参考文献[6]) の想定を踏襲し果樹園は低木の多い農地と想定して, 可燃物モデル No. 4 でモデル化する。
竹林	No. 4 Chaparral (低木の茂み)	竹林は生長が早く可燃物が密集しやすいと考えられるため, K サイト評価 (参考文献[6]) の想定を踏襲し火線強度が大きくなりやすく保守性の大きい可燃物モデル No. 4 でモデル化する。
砂丘植生	No. 5 Brush (茂み)	土地利用データの「荒地」と同等の植生と想定し, 可燃物モデル No. 5 でモデル化する。
緑の多い住宅地	No. 5 Brush (茂み)	土地利用データの「建物用地」と同等の植生と想定し, 可燃物モデル No. 5 でモデル化する。
伐跡群落/ ブナクラス域	No. 13 Heavy Slash (倒木)	伐跡群落は倒木が多い領域と想定し, 倒木の多い土地の可燃物モデル No. 11~13 中で最も保守性の高い No. 13 でモデル化する。
伐跡群落/ ヤブツバキクラス域		

表 1 4 植生に応じた可燃物モデルの設定方法 (植生データ) (2/2)

データ区分	可燃物モデル	設定根拠
常緑針葉樹植林	No. 15 スギ 10 年生	1F 構外の常緑針葉樹植林は林齢が不明であるが、10 年生未満のスギが一樣に分布するような植生でないことを航空写真で確認の上、保守的に 10 年生と想定し可燃物モデル No. 15 でモデル化する。
アカマツ群落/ ブナクラス域	No. 20 マツ 10 年生	1F 構外のマツ群落は林齢が不明であるが、10 年生未満のマツが一樣に分布するような植生でないことを航空写真で確認の上、保守的に 10 年生と想定し可燃物モデル No. 20 でモデル化する。
アカマツ群落/ ヤブツバキクラス域		
カスミザクラ コナラ群落 /ブナクラス域	No. 24 落葉広葉樹	1F 構外の広葉樹群落については、広葉樹の種類に関わらず「落葉広葉樹」にまとめ、可燃物モデル No. 24 でモデル化する (K サイト評価 (参考文献 [6]) の想定を踏襲)。
コナラ群落/ ヤブツバキクラス域		
桑園	No. 24 落葉広葉樹	桑は落葉性の高木あるいは低木であること (参考文献 [9]) から、桑園は落葉広葉樹林と同等の植生と想定し可燃物モデル No. 24 でモデル化する。

表 1 5 植生に応じた可燃物モデルの設定方法（現地植生調査結果）

データ区分	可燃物モデル	設定根拠
アカマツ 10 年生以上	No. 20 マツ 10 年生	1F 構内のアカマツ・クロマツは、実生マツ以外は林齢が 10 年生以上だが、保守側に可燃物モデル No. 20「マツ 10 年生」とした。
クロマツ 10 年生以上		
サクラ	No. 24 落葉広葉樹	1F 構内の街路樹はほぼ全てサクラであることから、落葉広葉樹の可燃物モデル No. 24 とした。
スギ 10 年生以上	No. 15 スギ 10 年生	1F 構内のスギは林齢が 10 年生以上だが、保守側に可燃物モデル No. 15「スギ 10 年生」とした。
マツ 10 年生未満	No. 19 マツ 10 年生未満	1F 構内の実生マツは林齢が 10 年に満たないため、可燃物モデル No. 19「マツ 10 年生未満」とした。
広葉樹（雑木）	No. 24 落葉広葉樹	クスギ等の広葉樹からなる雑木林は、可燃物モデル No. 24「落葉広葉樹」とした。
竹林	No. 4 Chaparral (低木の茂み)	表 1 3 「竹林」と同様。
草地	No. 3 Tall Grass (丈の高い草地)	樹木が少なく草が繁茂した植生領域は、草地の可燃物モデルの中で最も厳しいモデルである No. 3「丈の高い草地」とした。
伐採木	No. 81 伐採木	伐採木の堆積高さは平均約 4m であったことから、これをもとに伐採木の可燃物モデル No. 81 を作成し設定した。
除草後領域	No. 1 Short Grass (丈の低い草地)	除草を実施する領域（図 1 6 参照）は刈り残しや新たに少量繁茂する草を考慮し、平均丈 30cm 程度の可燃物モデル No. 1「丈の低い草地」とした。

2.1.2.3 気象情報・火災件数の収集及び分析

森林火災影響評価の入力のうち気象条件は附属書Aに従い、森林火災の発生件数が多い月の過去10年間※の気象データを調査し、現地で起こり得る最悪の条件を検討する必要がある。また発火点条件は附属書Aに従い、風向を卓越風向としたときの発電所風上に設定する必要がある。

よって、日本全国及び福島県の森林火災発生件数と1F周辺で観測された過去10年間の気象データを調査し、気象条件及び発火点条件を設定した。

※本評価は2019年に実施したものであるため、2019年から過去10年間のデータを用いている。

(1) 火災発生件数の分析

日本全国における森林火災の発生件数は消防庁発行「消防白書」(参考文献[10])より、福島県における森林火災の発生件数は福島県農林企画課発行「福島県農林水産業の現状」(参考文献[11])より、それぞれ調査した。過去10年間(平成20年～29年)に発生した森林火災は、全国、福島県ともに3～5月に件数が多い(図2-3参照)。よって、1F森林火災の影響評価に用いる気象条件は、森林火災発生件数の多い3～5月の気象条件から設定することとした。

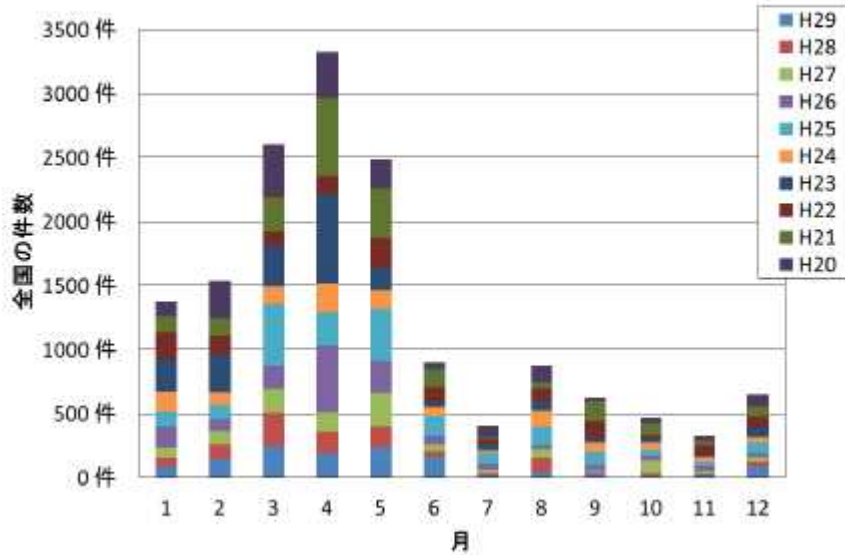
また、「消防白書」(参考文献[10])より、全国の森林火災の出火原因割合を調査した。平成15～24年度の林野火災の主な発生原因は図2-4に示すとおり、件数の多い順でたき火約4500件、火入れ約2300件、放火(疑い含む)約1500件となっている。いずれの発生原因も、民家、田畑周辺あるいは道路沿いで発生する人為的行為となっている。

ここで、1F周辺は立ち入り制限区域であることから、人間が立ち入るのは常磐道ないし主要国道近辺に限られると想定され、常磐道沿いあるいは国道沿いを発火点と設定することが適切と考えられる。

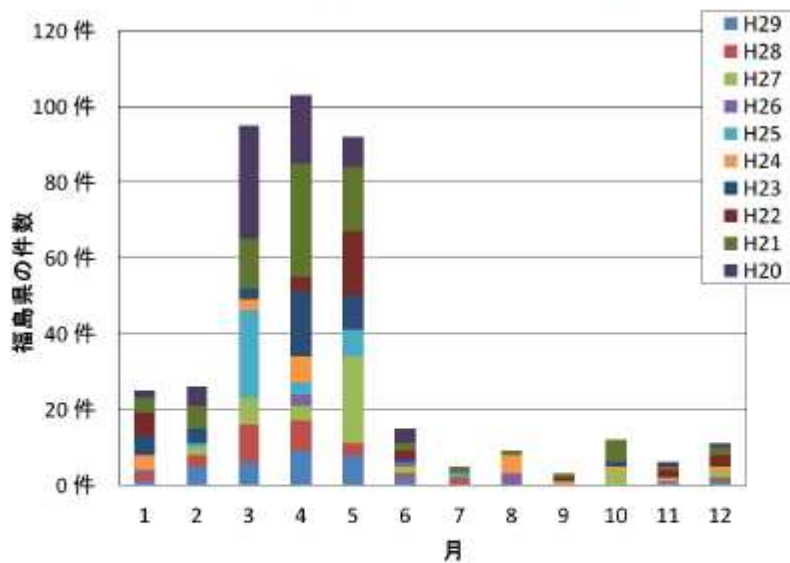
よって附属書Aの記載通り、人為的行為が予想される道路沿いに発火点を設定することとした。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

過去 10 年間の全国及び福島県における森林火災発生件数の調査を行い、3～5 月にかけて森林火災の発生件数が多いことを確認した。



全国の森林火災発生件数 (平成 20 年～29 年)



福島県の森林火災発生件数 (平成 20 年～29 年)

<出典>

全 国：平成 20～29 年度版 消防白書（消防庁、参考文献[17]）より作成

福島県：令和元年 7 月版 福島県農林水産業の現状（福島県、参考文献[18]）より作成

図 2 3 森林火災調査結果

図は最新の情報に合わせて評価中

全国の原因別森林火災発生件数(H21～30年)

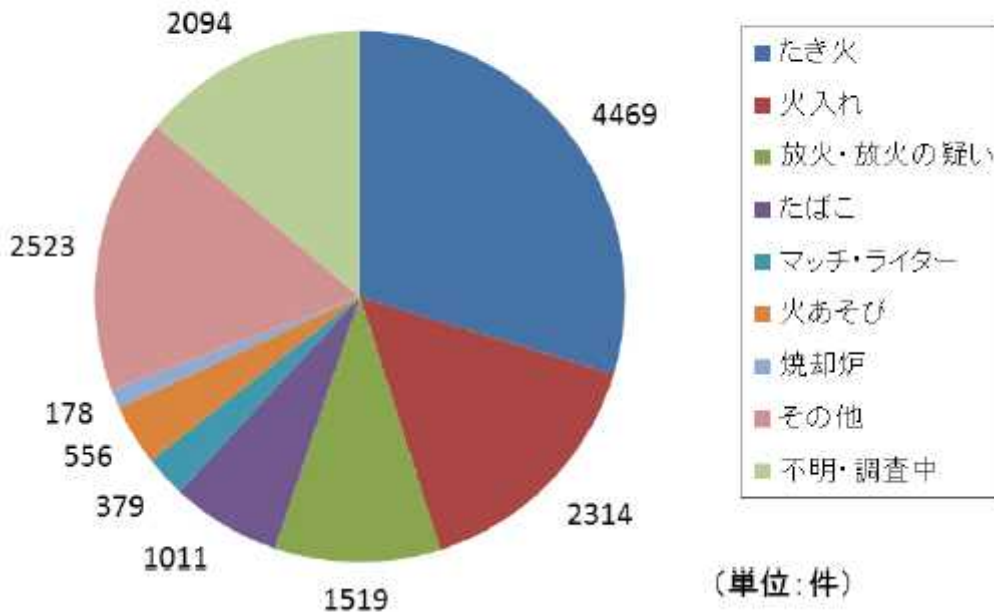


図 2 4 森林火災の出火原因割合 (平成 21～30 年)

図は最新の情報に合わせ評価中

(2) 入力気象条件の設定

前述のように、森林火災の発生件数の多い3～5月の気象条件から設定する。3～5月の過去10年間の気象データ（気象庁が公開している気象統計情報、参考文献[12]）を調査し、卓越風向、最大風速、最高気温、及び最小湿度の条件を選定した（表16参照）。

福島県における気象統計情報の観測所位置を図25に示す。風向、風速及び気温は1F付近の浪江町、川内町、及び広野町の地域気象観測システム（アメダス）の値を調査し、3地点における3～5月の過去10年間における卓越風向、最大風速、及び最高気温とした。

湿度を観測している観測所は図25より、「福島」「小名浜」「若松」「白河」とある。しかし、「小名浜」以外の3地点は1Fから距離が遠く、かつ内陸に位置することから、「小名浜」の値を調査し、3～5月の過去10年間における最小湿度を解析に使用した。また、附属書Aの記載に従い雲量及び降水量はともに0と設定した。詳細については以降に後述する。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

卓越風向の設定

浪江町、川内町、及び広野町で観測された過去10年間の3～5月の最大風速観測時風向及び最多風向を図26に、卓越風向を表17にそれぞれ示す。

1F周辺において最も発生頻度が高いのは西北西の風と読み取れる。このことから、本解

析評価に使用する卓越風向は西北西とした。

一方、浪江のデータに限れば、発生頻度が最も高いのは西風である。また JNES-RC-Report（参考文献[8]）において西風が解析評価に使用されていたことも考慮し、西風も卓越風向に含めて解析評価に使用することとした。

なお、南南東や南東の風は 1F 東側が海であることを考慮し、解析評価に使用しないこととした。

最大風速の設定

浪江町、川内町、及び広野町で観測された過去 10 年間の 3～5 月の最大風速及びその観測時の風向を表 1 8 に示す。

1F 周辺において過去 10 年間の 3～5 月に観測された最大風速は、2013 年 4 月に広野で観測された 16.4m/s である。以上から、本解析評価においては 16.4m/s を、3～5 月に 1F 周辺で起こり得る最悪の条件（最大風速）として使用することとした。

また、上記の 16.4m/s の観測時風向は西北西であり、3～5 月の二番目に大きい風速（16.3m/s、2017 年 4 月に浪江町にて観測）の観測時風向は西であることから、卓越風向として西北西と西を設定することが妥当と確認できた。

最高気温・最小湿度の設定

浪江町、川内町、及び広野町で観測された過去 10 年間の 3～5 月の最高気温と、小名浜で観測された過去 10 年間の 3～5 月の最小湿度を、併せて表 1 9 に示す。

気温については、2018 年 5 月に広野で観測された 33.5℃が、過去 10 年間の 3～5 月の 1F 周辺における最高気温である。湿度については、2011 年 4 月に小名浜で観測された 13%が、過去 10 年間の 3～5 月の 1F 周辺における最小湿度である。

以上から、3～5 月に 1F 周辺で起こり得る最悪の条件（気温、湿度）として、気温 33.5℃、湿度 13%を解析評価に使用する。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

雲量・降水量の設定

附属書 A の記載に従い、保守側の想定として雲量及び降水量はともに 0 と設定した。

設定値は最新の情報に合わせ評価中

表 1 6 過去 10 年間の 3～5 月の卓越風向・最大風速・最高気温・最小湿度

3～5 月 卓越風向[16 方位]	3～5 月 最大風速[m/s]	3～5 月 最高気温[℃]	3～5 月 最小湿度[%]
西北西／西	16.4	33.5	13



観測表は 1 時間毎に自動で更新しています。
このため、機器や通信の不良・メンテナンスによりデータが欠落したり、データの修正を行う場合があります。

シンボル	観測所の種類	観測要素
■	気象台	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
■	測候所・特別地域気象観測所	気温・降水量・風向風速・日照時間・湿度・気圧
■	測候所・特別地域気象観測所	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
■	地域気象観測所(アメダス)	降水量
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速・日照時間
■	地域気象観測所(アメダス)	気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深

< 出典 > 気象庁 HP : http://www.jma.go.jp/jp/amedas_h/map25.html

図 2 5 福島県内の気象観測所位置

図は最新の情報に合わせ評価中

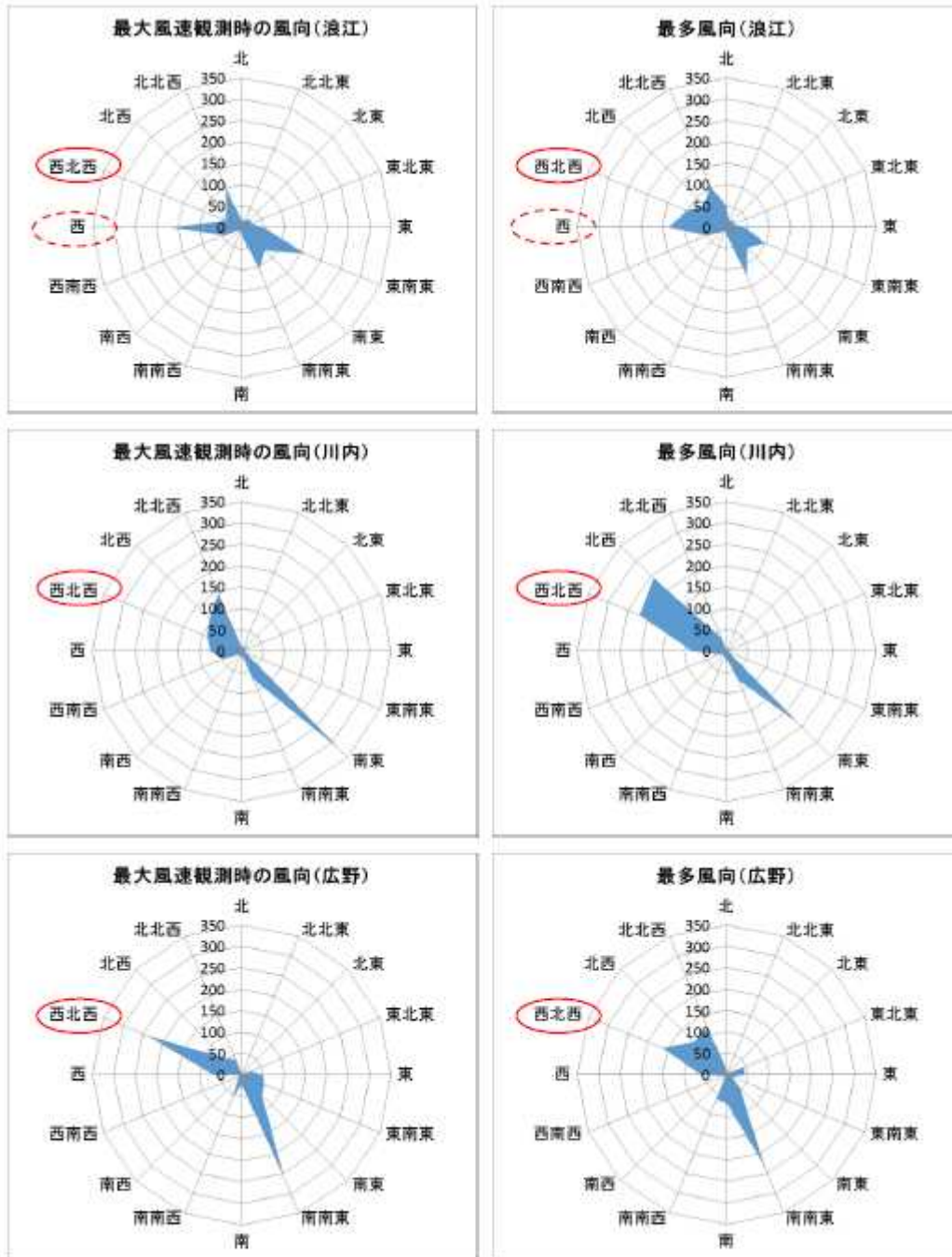


図 2 6 最多風向及び最大風速観測時の風向

図は最新の情報に合わせ評価中

表 1 7 各地点における 2010～2019 年の 3～5 月の卓越風向（最多風向）

年	月	卓越風向（浪江）	卓越風向（広野）	卓越風向（川内）
2019	3	西/北北西	西北西	北西
	4	南南東	南南東	北西
	5	南南東	南南東	南東/南南東/西北西
2018	3	北北西	南南東	北西
	4	北北西	西北西	南東
	5	南南東	南南東	南東
2017	3	北西	西/西北西/北北西	西北西
	4	南東	南南東	南東/西北西
	5	東南東	南南東	南東
2016	3	西/西南西/西北西	西	北西
	4	北/東南東	北西	北西
	5	南南東	南南東	南東
2015	3	西	西北西	南東/北西
	4	東南東/南南東/北北西	北北西	南東
	5	南南東	南南東	北西
2014	3	西	西北西	西北西/北西
	4	西/南南東	西北西	西北西
	5	東南東/西北西	南南東	北西
2013	3	西	西北西	西北西/北西
	4	西/北西	西北西	北西
	5	南南東	南南東	南東
2012	3	西北西	西北西	西北西
	4	西/北東	西北西	南東
	5	東南東/西北西	南南東	南東
2011	3	西北西	西北西	西北西
	4	南南東	南南東	西北西/北西
	5	南東	南南東	南東
2010	3	北北西	北北西	西北西
	4	北北西	北北西	西北西
	5	東南東	南南東	南東

※青・水色で塗りつぶした箇所が卓越風向。

灰色で塗りつぶした箇所は海からの風であり評価に考慮しない。

表 1 8 各地点における 2010～2019 年の 3～5 月の最大風速及びその観測時風向

年	月	最大風速 [m/s]	最大風速観測時 風向[16 方位]	最大風速 観測地点
2019	3	10.7	西	浪江
	4	13.1	西南西	浪江
	5	9.8	南南東	浪江
2018	3	14.3	西南西	浪江
	4	10.9	西	浪江
	5	6.8	南西	浪江
2017	3	9.5	西北西	広野
	4	16.3	西	浪江
	5	9.5	西	浪江
2016	3	12.3	西北西	広野
	4	10.4	西北西	浪江
	5	10.2	西	浪江
2015	3	13.8	西	浪江
	4	9.6	西	浪江
	5	10.0	西北西	広野
2014	3	11.6	西北西	浪江
	4	11.1	西北西	広野
	5	13.0	西	浪江
2013	3	16.3	西北西	広野
	4	16.4	西北西	広野
	5	8.4	西	浪江
2012	3	10.3	西北西	広野
	4	11.0	西南西	広野
	5	9.4	西北西	広野
2011	3	8.2	西北西	広野
	4	12.2	西北西	広野
	5	13.7	西	浪江
2010	3	14.4	西	浪江
	4	14.5	西	浪江
	5	8.3	西北西	広野

※青で塗りつぶした箇所が、最大風速及び観測時風向。

水色で塗りつぶした箇所が、二番目に大きい風速及び観測時風向。

設定値は最新の情報に合わせ評価中

表 1 9 各地点における 2010～2019 年の 3～5 月の最高気温及び最小湿度

年	月	最高気温 [℃]	最高気温 観測地点	最小湿度 [%]	最小湿度 観測地点
2019	3	22.1	浪江	21	小名浜
	4	24.2	浪江	15	小名浜
	5	32.2	川内	20	小名浜
2018	3	24.9	浪江	19	小名浜
	4	31.3	浪江	21	小名浜
	5	33.5	浪江	25	小名浜
2017	3	17.7	浪江	20	小名浜
	4	27.7	広野	20	小名浜
	5	31.7	川内	18	小名浜
2016	3	21.0	浪江	16	小名浜
	4	25.4	浪江	21	小名浜
	5	29.8	川内	21	小名浜
2015	3	22.4	川内	19	小名浜
	4	32.0	浪江	20	小名浜
	5	30.9	浪江	24	小名浜
2014	3	24.2	浪江	20	小名浜
	4	25.0	浪江	15	小名浜
	5	30.2	川内	24	小名浜
2013	3	24.0	浪江	18	小名浜
	4	24.7	浪江	23	小名浜
	5	27.1	浪江	26	小名浜
2012	3	23.7	浪江	19	小名浜
	4	28.1	川内	20	小名浜
	5	25.4	浪江	24	小名浜
2011	3	14.9	広野	21	小名浜
	4	24.9	浪江	13	小名浜
	5	30.4	浪江	23	小名浜
2010	3	21.2	川内	25	小名浜
	4	22.0	浪江/広野	23	小名浜
	5	27.7	浪江	29	小名浜

※青で塗りつぶした箇所が、最高気温，最小湿度

(3) 発火点の設定

設定方針を以下に示す。

発火点の設定方針

- ・ 1F からの直線距離 10km の間に設定する。
- ・ 陸側方向（1F の東側は海）の風上を選定する。
- ・ 風向は前項にて選定した卓越風向（西北西，西）とする。
- ・ 人為的行為を考え、交通量が多く火災の発生頻度が高いと想定される道路（常磐道，国道 6 号等）沿いを選定する。

上記の設定方針に加えて、発火点から 1F までの距離が火災の規模及び火災到達時間に影響を与えることを踏まえ、図 2 7 及び図 2 8 に示すように発火点を 4 点設定した。以下に、各発火点の設定理由及び設定の妥当性確認を示す。

(ケース 1)

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

1F 近隣からの発火の方が防火帯周辺に火災が到達するまでの時間が短くなることから、1F 敷地境界周辺の国道 6 号線沿いの発火を想定する。防火帯までの距離が短くなり、かつ最大風速記録時の風向である西北西方向の国道 6 号線沿いに発火点を選定する（防火帯から約 1.3km）。

ケース 1 の発火点周辺は水田（評価では「Tall Grass（丈の高い草地）」のデータを入力）が広がっており平坦な地形である。

(ケース 2)

1F 遠方からの発火の方が火災の規模が大きくなる（火災前線が広がり、発電所構内を同時期に取り囲むような火災となる）ことから、1F から距離が遠く、かつ人間活動が多い常磐道沿いの発火を想定する。発電所から見て最大風速記録時の風向である西北西方向の常磐道沿いに発火点を選定する（防火帯から約 6.1km）。

ケース 2 の発火点周辺はアカマツ（評価ではマツ 10 年生のデータを入力）の植生が広がっており、その先は田畑が広がる。また、1F に向けて下り勾配である。

(ケース 3)

卓越風向として西方向からの風も一部存在することを考慮して、1F 西側の発火を想定する。

この際の発火点は、JNES-RC-Report（参考文献[8]）にて使用された発火点である、国道 6 号沿いの田（防火帯から約 2km）を使用する。

ケース 3 の発火点周辺は水田が広がっており平坦な地形である。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

(ケース 4)

ケース 3 同様に 1F 西側の発火を想定する。また、ケース 2 同様に火災の規模拡大の観点から、発電所からの距離が遠い発火点を想定する。この際の発火点は、JNES-RC-Report (参考文献[8]) にて使用された発火点である国道 35 号沿いの田 (防火帯から約 6.7km) を使用する。

ケース 4 の発火点周辺は水田が広がっており平坦な地形である。

上記のケース 1~4 に加えて、本評価における解析の妥当性と条件設定の保守性を確認することを目的に、JNES-RC-Report (参考文献[8]) で使用された気象条件を用いた解析を、以下 2 ケース行うこととした。

(ケース 5)

ケース 3 と同じ発火点ならびに JNES-RC-Report (参考文献[8]) において比較的評価条件の厳しいケース 7 (湿度が最小、気温が最大、風速が 2 番目に大きい) の気象条件を用いて解析を行う。

(ケース 6)

ケース 4 と同じ発火点ならびに JNES-RC-Report (参考文献[8]) において比較的評価条件の厳しいケース 7 の気象条件を用いて解析を行う。

設定した 4 つの発火点を図 2 7 及び図 2 8 に示す。また、上記ケース 1~6 の解析評価に使用する気象条件を表 2 0 に示す。

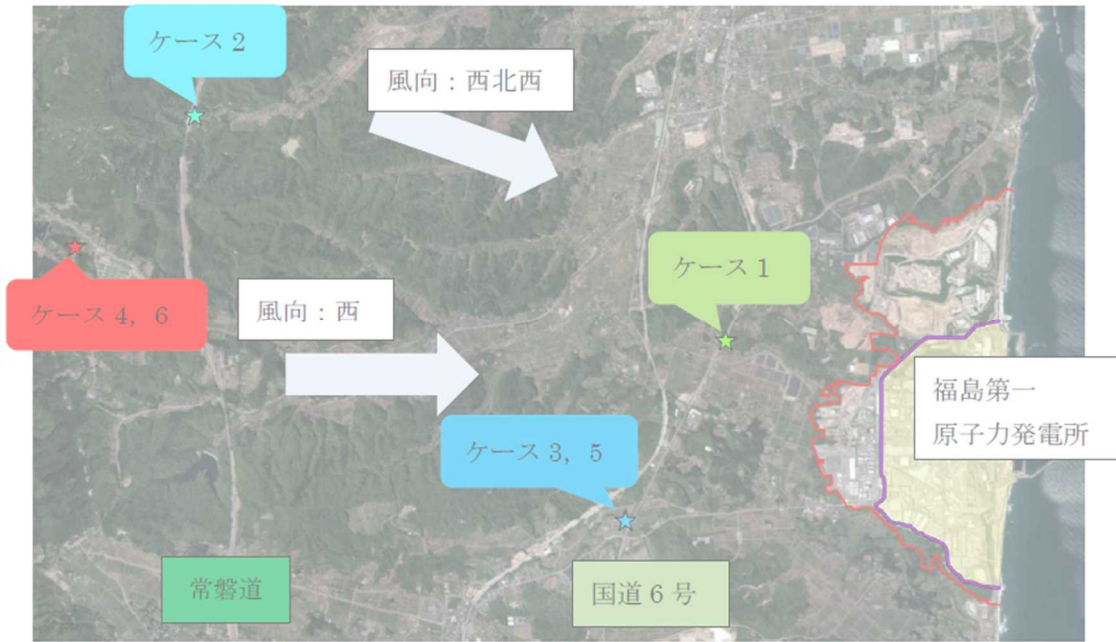


図 2 7 想定発火点位置 (衛星写真)

図は最新の情報に合わせ評価中



図 2 8 発火点位置と道路位置 (ArcGIS 標準地図)

図は最新の情報に合わせ評価中

表 2 0 各ケースの入力気象条件

ケース No.	風向 [16 方位]	風速 [km/h]	気温 [°C]	湿度 [%]	備考
1	西北西	59 ¹⁾	34 ³⁾	13	過去 10 年間の気象データから設定された、3~5 月に 1F 周辺で起こり得る最も厳しい気象条件。
2	西北西	59 ¹⁾	34 ³⁾	13	
3	西	59 ¹⁾	34 ³⁾	13	
4	西	59 ¹⁾	34 ³⁾	13	
5	西	52.2 ²⁾	30 ³⁾	5	JNES-RC-Report (参考文献[8]) において比較的評価条件の厳しいケース 7 の気象条件。
6	西	52.2 ²⁾	30	5	

- 1) 表 1 8 に示した風速 16.4m/s を km/h 単位 (FARSITE 入力用の単位) に換算した値。
- 2) JNES-RC-Report (参考文献[8]) において比較的厳しい風速条件 (14.5m/s) を km/h 単位に換算した値。
- 3) 表 1 9 に示した気温 33.5°C を整数値に切り上げた値。

2.1.2.4 火災進展評価

地形マップ・可燃物マップ気象条件・発火点条件を入力として、FARSITE を用いて森林火災進展解析を実施し、1F に到達する火災の規模及び火災到達時間を評価する。

本評価においては、表 2 1 に示す①～⑩の 10 ケースを実施した。発火時刻によって解析結果は変動するため、北側、南側それぞれにおいて最大火線強度が観測される発火時刻を入力し、各ケース 1～6 それぞれに対して北側・南側 2 ケースを実施した。

設定値は最新の情報に合わせ評価中

表 2 1 評価ケース一覧

ケース No.		評価ケース
1	北側	① ¹⁾
	南側	
2	北側	②
	南側	③
3	北側	④
	南側	⑤
4	北側	⑥
	南側	⑦
5	北側	⑧
	南側	⑨
6	北側	⑩ ¹⁾
	南側	

1) ケース 1, 6 では同じ発火時刻条件のときに北側、南側ともに最大火線強度を観測した。

FARSITE に入力する条件は 2.1.1 項に基づき以下の通りとする。

森林火災の想定

- ・ 植生データは森林の現状を把握するため、樹種や生育状況に関する情報を有する自然環境保全基礎調査植生調査データの空間データを入力し、その情報を元に可燃物パラメータを保守的に設定した。
- ・ 気象条件は 1F 近傍の観測地点における過去 10 年間（2010～2019 年）の気象データを調査し、森林火災の発生件数の多い 3～5 月の最小湿度、最高気温及び最大風速の組み合わせとした。但しケース 5 及び 6 については、JNES-RC-Report（参考文献[8]）のケース 7 の気象条件を踏襲することとした
- ・ 上記の気象データ調査結果から、最大風速観測時の風向及び卓越方向を考慮して、風向は西北西及び西に設定した。
- ・ 発火点は 1F 風上、直線距離 10km の間に設定した。発火源は人為的行為を考慮し、道路沿いを発火点とした。
- ・ 放水等による消火活動は期待しない。

評価指標

表 2 2 に示す評価指標のうち、火炎輻射発散度及び火炎輻射強度以外は FARSITE を用いて算出する。火炎輻射発散度と火炎輻射強度は FARSITE 出力を基に別途算出する。また、火炎到達幅については K サイト評価（参考文献[6]）同様、防火帯長さとする。

表 2 2 森林火災の評価指標及び評価の観点

評価指標	評価の観点	FARSITE 出力有無
延焼速度[km/h]	・ 火炎発生後、どの程度の時間で 1F に到達するのか	○
火炎到達時間[h]		○
火線強度[kW/m]	・ 1F に到達し得る火災の規模はどの程度か ・ 必要となる消火活動能力や防火帯の規模はどの程度か	○
反応強度[kW/m ²]		○
火炎長[m]		○
単位面積当たり熱量[kJ/m ²]		○
火炎輻射発散度[kW/m ²]		出力から別途算出
火炎輻射強度[kW/m ²]		出力から別途算出
火炎到達幅[m]		○（防火帯長さとする）

解析範囲

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

解析範囲は JNES-RC-Report（参考文献[8]）における解析範囲広さ（南北 8.5km、東西 11km）を参考に、図 2 7 の発火点 4 点をカバー可能な南北 7km、東西 9km とした。

入力条件及び解析設定

主要な入力条件とその設定方法を表 2 3 に示す。FARSITE の解析設定を表 2 4 及び表 2 5 に示す。

防火帯の設定

本評価における 1F 防火帯の設定位置を図 2 9 に示す。1F 近傍の可燃物分布も併せて図 2 9 に示す。

1F 西側は非植生領域（駐車場，建物など）が広範囲に分布し，可燃物は街路樹等が点在するのみである。また，1F 北側は整地区画や建物といった非植生領域が多く，防火帯近傍に火災が到達する領域は限られる。このことから，1F 西側，北側の火線強度は南側に比べて小さくなると考えられる。本評価では，図 2 9 中の赤矢印に示すように防火帯を北・西・南の 3 区画に分割して，防火帯幅を評価することとした。防火帯幅の評価に用いる最大火線強度は，FARSITE 解析上では 1F 西側に延焼が広がらないと想定できることから，北側防火帯近傍，南側防火帯近傍それぞれにおける最大火線強度を算出することとした。

表 2 3 FARSITE の主要な入力条件及びその設定方法

入力条件	作成方法
<ul style="list-style-type: none"> ・可燃物マップデータ ・樹冠率マップデータ ・樹高マップデータ ・枝下高さマップデータ ・樹冠かさ密度マップデータ 	<p>可燃物マップデータは附属書Aに従い，下記データを統合して作成。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土地利用データ ・植生データ ・現地植生調査結果 <p>樹冠率・樹高・枝下高さ・樹冠かさ密度マップデータは，森林の可燃物モデルが設定されたメッシュに対し以下の値に設定。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・樹冠率：区分 3 ・樹高：15m ・枝下高さ：4m ・樹冠かさ密度：0.2kg/m³
<ul style="list-style-type: none"> ・標高マップデータ ・傾斜角マップデータ ・傾斜方位マップデータ 	<p>標高マップデータは附属書Aに従い，国土地理院の基盤地図情報 数値標高モデルデータ（参考文献[3]）を使用。</p> <p>傾斜角及び傾斜方位マップデータは，ArcGIS を用いて標高データより算出。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・風速，風向，気温，湿度 ・降水量，雲量 ・発火点 	<p>風速，風向，気温，湿度は附属書Aに従い，1F 周辺における過去 10 年間の 3～5 月（森林火災の多い月）の気象データから設定。</p> <p>降水量，雲量は保守側の想定として，ともに 0 と設定。</p> <p>発火点は，1F 風上の道路沿いに設定。</p>

表 2 4 FARSITE の解析設定 (1/2)

解析設定	設定条件	設定方法
緯度 (Latitude)	37 度	1F が立地する福島県大熊町の緯度 (約 37 度 2 分, 参考文献[13]) を, 日射量の大きくなる赤道側に切り下げて設定。
可燃物の初期水分量 (Moisture)	初期水分量については下記に設定し, コンディショニング機能を使用。 ・ 1h ¹⁾ : 5% ・ 10h ¹⁾ : 8% ・ 100hr ¹⁾ : 12% ・ 生体可燃物 : 100% (木質, 草どちらも)	初期水分量は K サイト評価 (参考文献[6]) 同様, FARSITE のデフォルト値を入力。 水分量は気温・湿度・日射等により変化するため, 発火時刻の 30 日前から現地の状況をシミュレートし, 初期水分量が平衡に達した状態から発火させる (コンディショニング機能, K サイト評価 (参考文献[6]) の設定を踏襲)。
火災伝播速度の制御 (Adjustment)	全て 1 を入力。	特定の可燃物モデルに対し, 火災伝播速度を係数倍して, 火災の広がり方を制御するパラメータ (参考文献[2])。 K サイト評価 (参考文献[6]) の設定を踏襲し, FARSITE デフォルト値である 1 (=制御無し) を入力。
燃焼継続時間 (Burn Period)	0 時~24 時	夜間は燃焼を止めるなど, 燃焼が継続しない時間を指定する際に使用するパラメータ (参考文献[2])。 本評価においては, 保守側の想定として燃焼が止まることは考えず, 0 時~24 時の間燃焼が継続するものとした。

1) 1h, 10h, 100h はそれぞれ, 1 時間, 10 時間, 100 時間以内に乾燥する可燃物を表す。可燃物の粒子径で表すと, 1h は 6.35mm 以下, 10h は 6.35mm~25.4mm, 100h は 25.4mm~76.2mm の可燃物に相当する (参考文献[2])。

表 2 5 FARSITE の解析設定 (2/2)

解析設定	設定条件	設定方法
樹冠火・飛び火等の設定 (Fire Behavior Option)	FARSITE デフォルト設定から変更しないものとした。	樹冠火の進展解析モデル，飛び火の着火確率等を設定する機能（参考文献[2]）。 K サイト評価（参考文献[6]）の設定を踏襲し，FARSITE デフォルトのまま変更しないものとした。
解析期間 (Duration)	<ul style="list-style-type: none"> ・発火時刻： 夏至（6月21日）の日射量が大きくなる10：00～14：00の間に最大火線強度が発生するよう，各ケースについて設定。 ・終了時刻： 発火時刻の24時間後。 	発火時刻については，日照による草地及び樹木の乾燥に伴い火線強度が増大することから，これらを考慮して火線強度が最大となるように設定した（K サイト評価（参考文献[6]）と同じ設定）。 終了時刻については林縁（防火帯近傍100m範囲内）がすべて延焼するように設定した。
時間ステップ (Time Step)	1分	K サイト評価（参考文献[6]）の設定を踏襲。
境界線空間解像度 (Perimeter Resolution)	10m	K サイト評価（参考文献[6]）の設定を踏襲し，メッシュサイズ10mと同じ値とした。
空間解像度 (Distance Resolution)		

1F 北側には非植生領域（整地区域、建物）が多く、可燃物が連続して分布しない
 →延焼は北西部にのみ到達すると推定可能

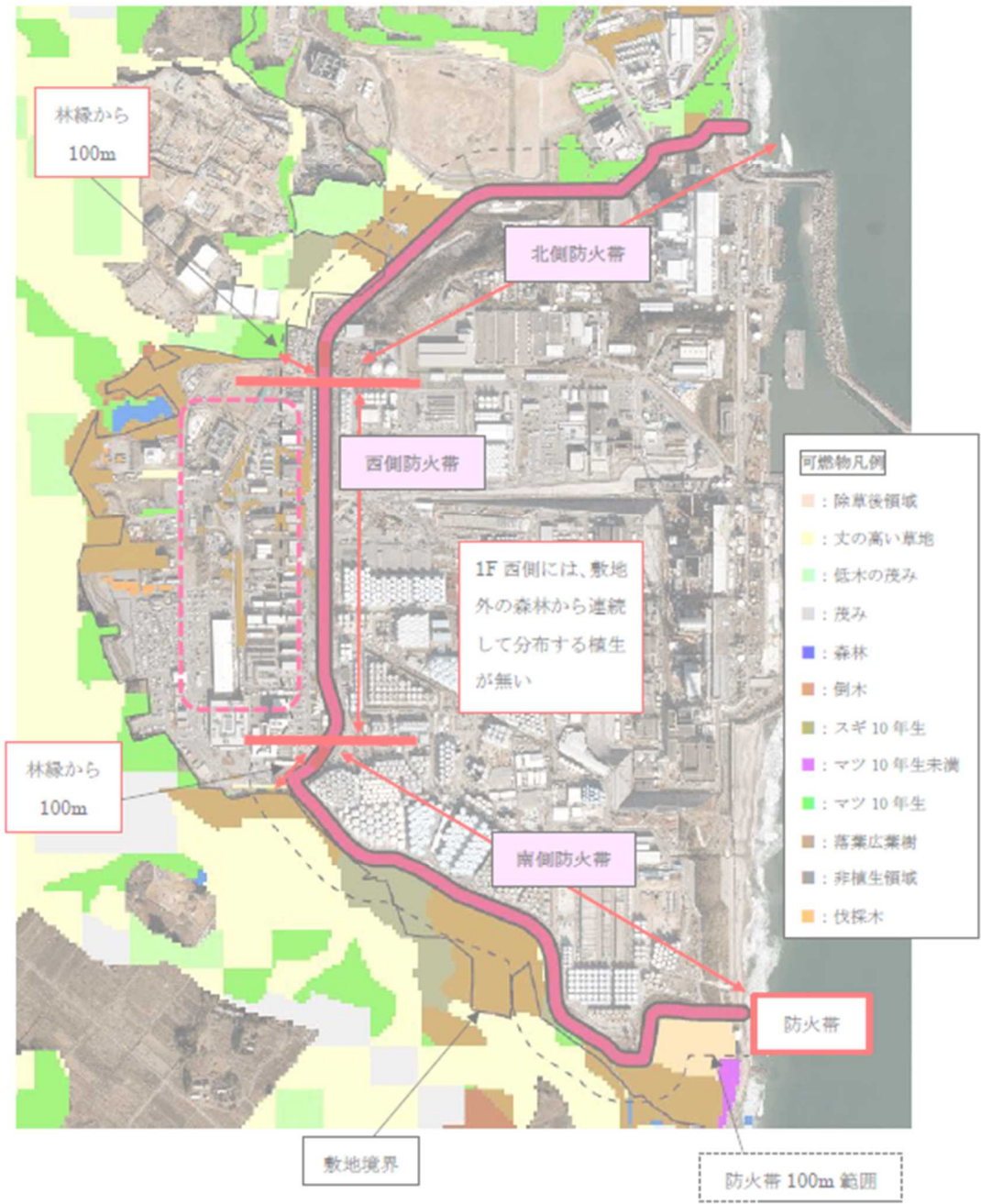


図 2 9 1F 防火帯及び周辺の可燃物分布

図は最新の情報に合わせ評価中

FARSITE による森林火災進展解析による、ケース 1～6 の解析結果概要（火炎到達時間、最大火線強度、最大火線強度観測時刻、発火時刻）を表 2 6 に示す。解析結果のうち、火炎到達時間分布と火線強度分布を図 3 0～図 4 9 に示す。

防火帯近傍 100m 範囲内における最大火線強度は、北側、南側ともケース 3（西風、1F から約 21m の発火点）で発生した。発生個所は図 2 9 と火線強度分布図とを比較し、1F 敷地外の草地（可燃物モデル No. 3）であることが確認された。また、西側防火帯近傍 100m 範囲内には火炎が到達しなかったことから、西側防火帯近傍の最大火線強度は 0kW/m とした。

ケース 3 と 5、ケース 4 と 6 は JNES-RC-Report（参考文献[8]）で使用されていたものと同じ発火点（参考文献[8]）を使用している。気象条件にも JNES-RC-Report（参考文献[8]）ケース 7 と同じ条件を用いたケース 5、6 の結果が、今回設定した気象条件（ベースケース）のケース 3、4 とおおむね一致することから、今回設定した条件による解析は妥当なものと考えられる。

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 2 6 FARSITE 解析結果概要

ケース No.	発火から火炎が林縁に到達するまでの時間	最大火線強度 [kW/m]	最大火線強度 観測時刻	発火時刻	
1	北側	1 時間 20 分	11655	13 : 51	10 : 30
	西側	到達しない	0	—	
	南側	1 時間 21 分	33804	11 : 36	
2	北側	10 時間 40 分	11005	13 : 15	0 : 20
	西側	到達しない	0	—	—
	南側	8 時間 50 分	30815	12 : 43	4 : 10
3	北側	3 時間 25 分	17986	10 : 25	7 : 00
	西側	到達しない	0	—	—
	南側	25 分	36965	10 : 45	10 : 30
4	北側	3 時間 18 分	16166	12 : 08	8 : 50
	西側	到達しない	0	—	—
	南側	4 時間 50 分	32065	12 : 12	6 : 50
5	北側	2 時間 30 分	20897	12 : 00	9 : 30
	西側	到達しない	0	—	—
	南側	26 分	36155	10 : 16	10 : 00
6	北側	3 時間 16 分	19408	11 : 16	8 : 00
	西側	到達しない	0	—	
	南側	3 時間 50 分	33823	12 : 14	

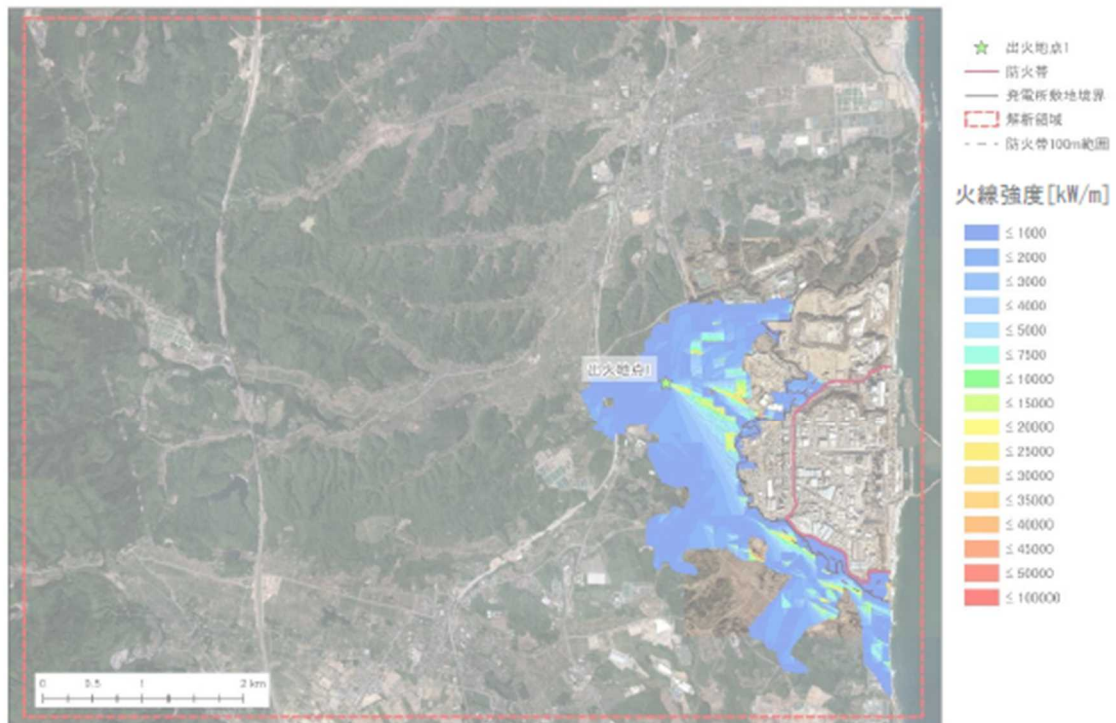
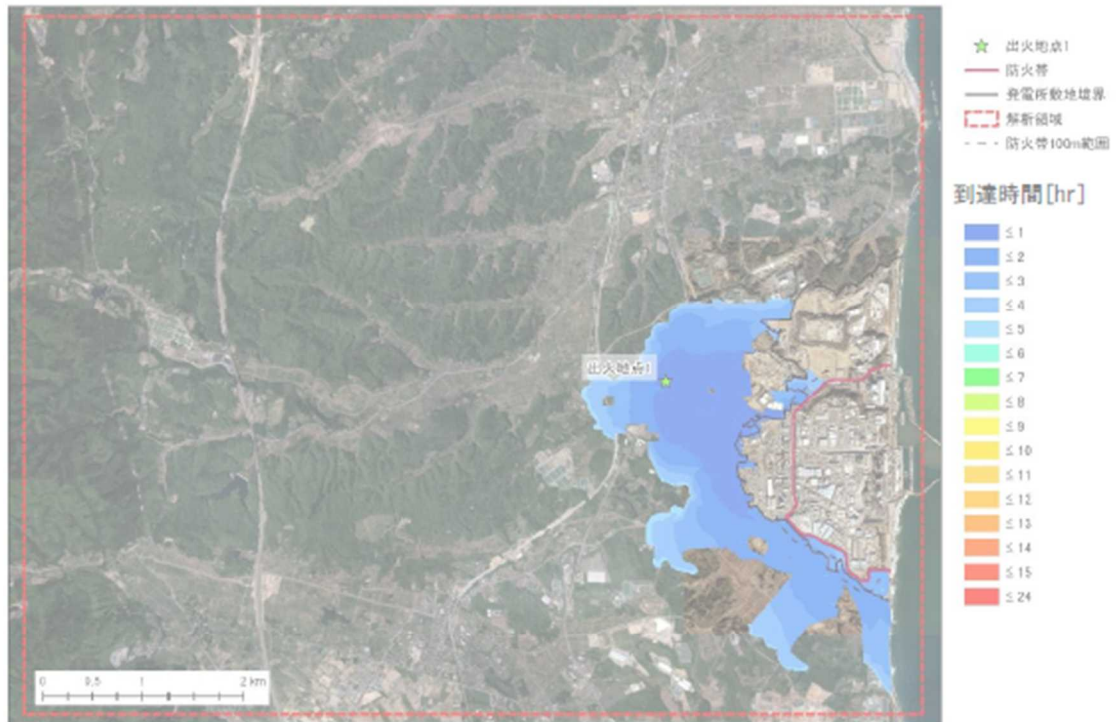


図30 ケース1解析結果（上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

※ケース1は同一条件で北側，南側防火帯近傍の最大火線強度を観測。

図は最新の情報に合わせ評価中

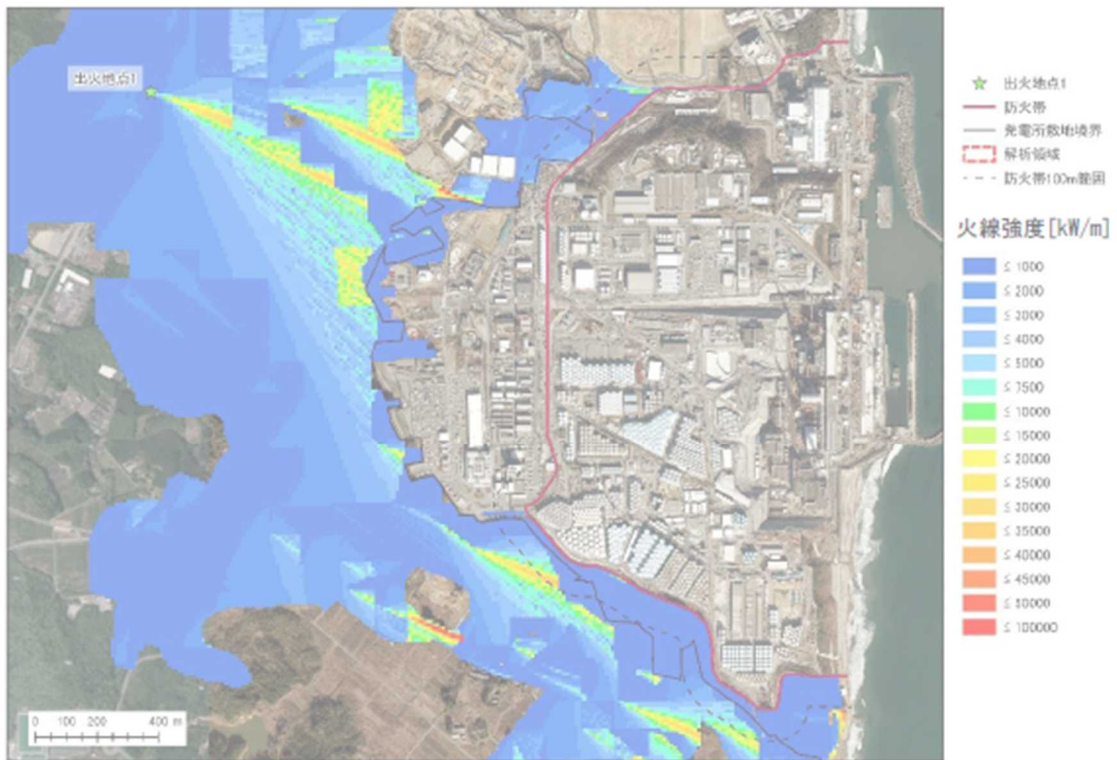


図 3 1 ケース 1 解析結果 敷地周辺拡大 (上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)
 ※ケース 1 は同一条件で北側，南側防火帯近傍の最大火線強度を観測。

図は最新の情報に合わせ評価中

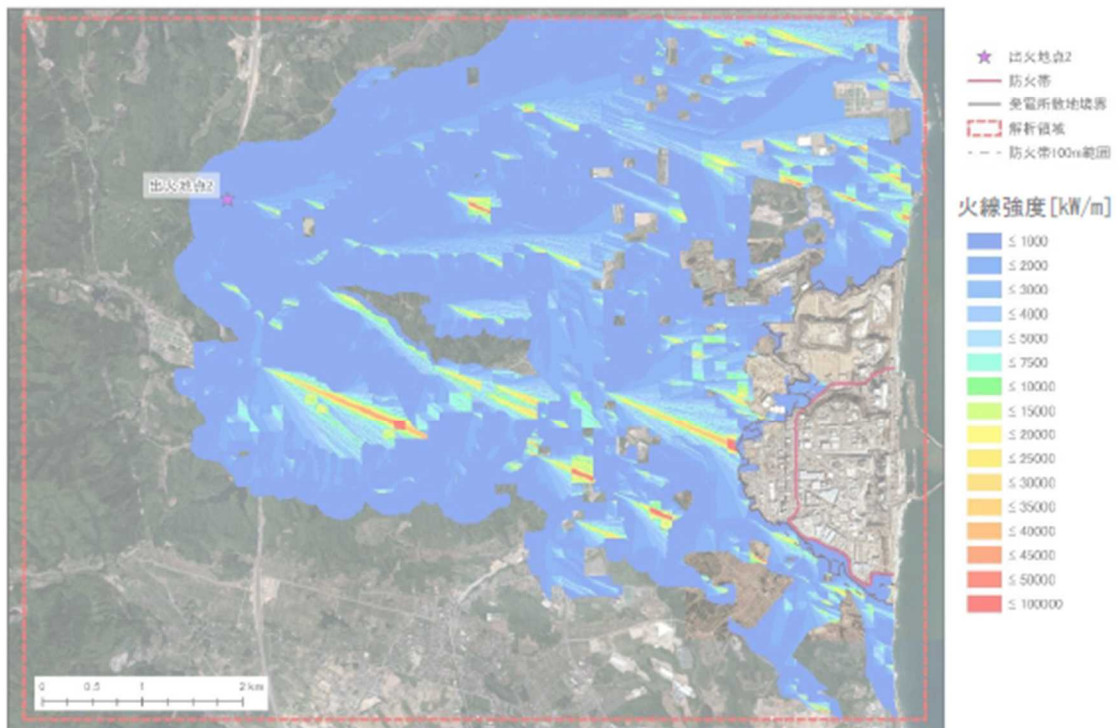
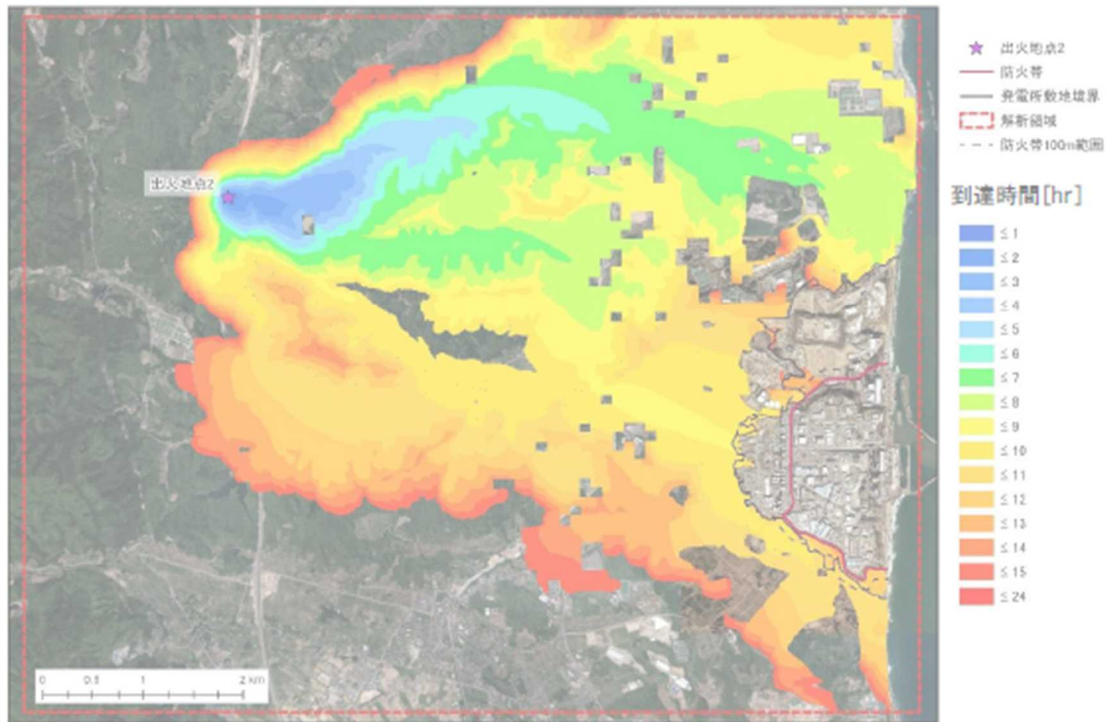


図3-2 ケース2解析結果（北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせて評価中

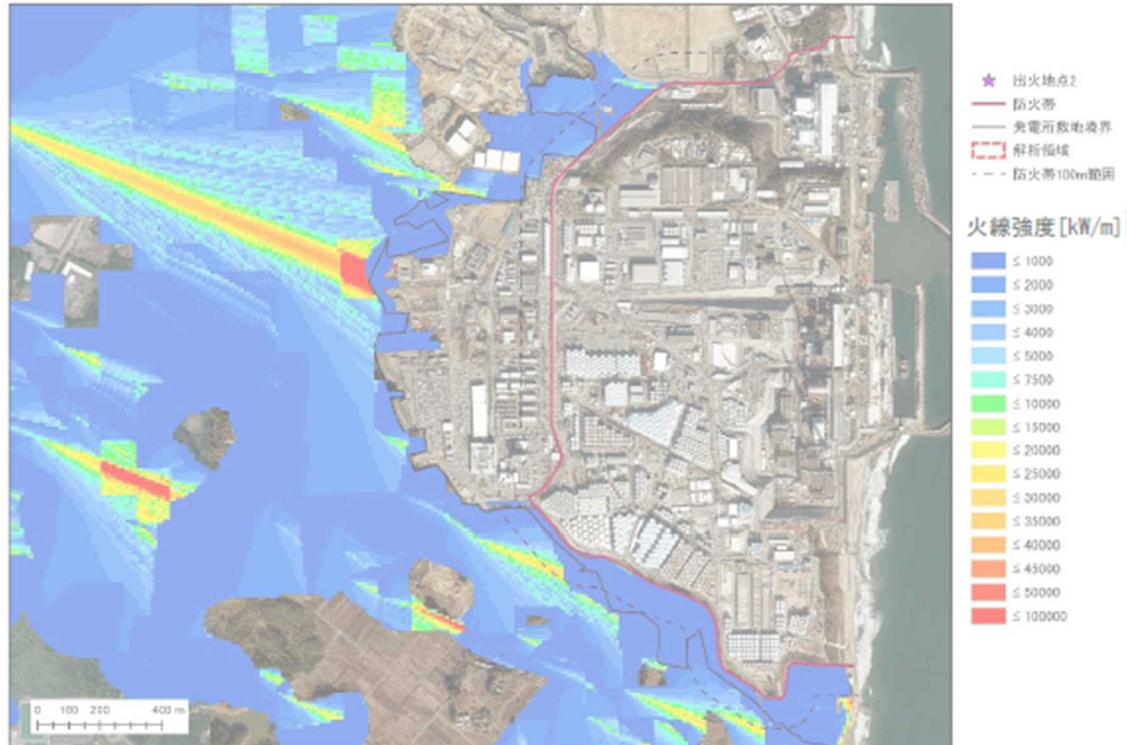
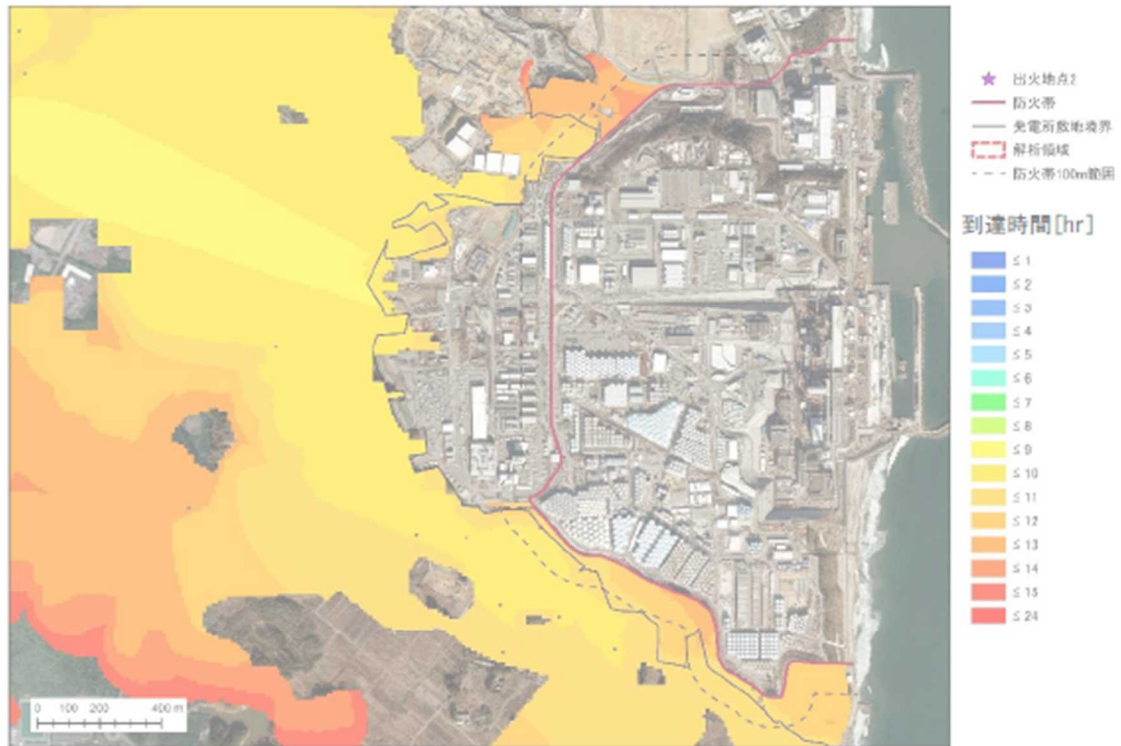


図 3 3 ケース 2 解析結果(北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
(上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

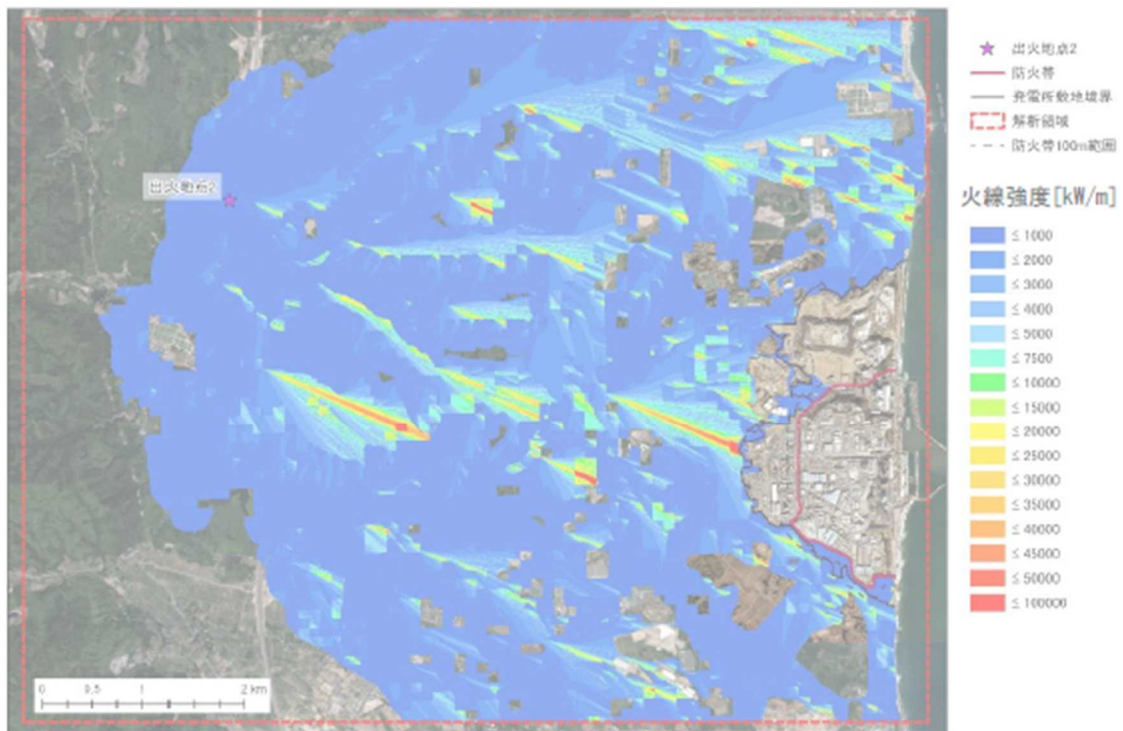
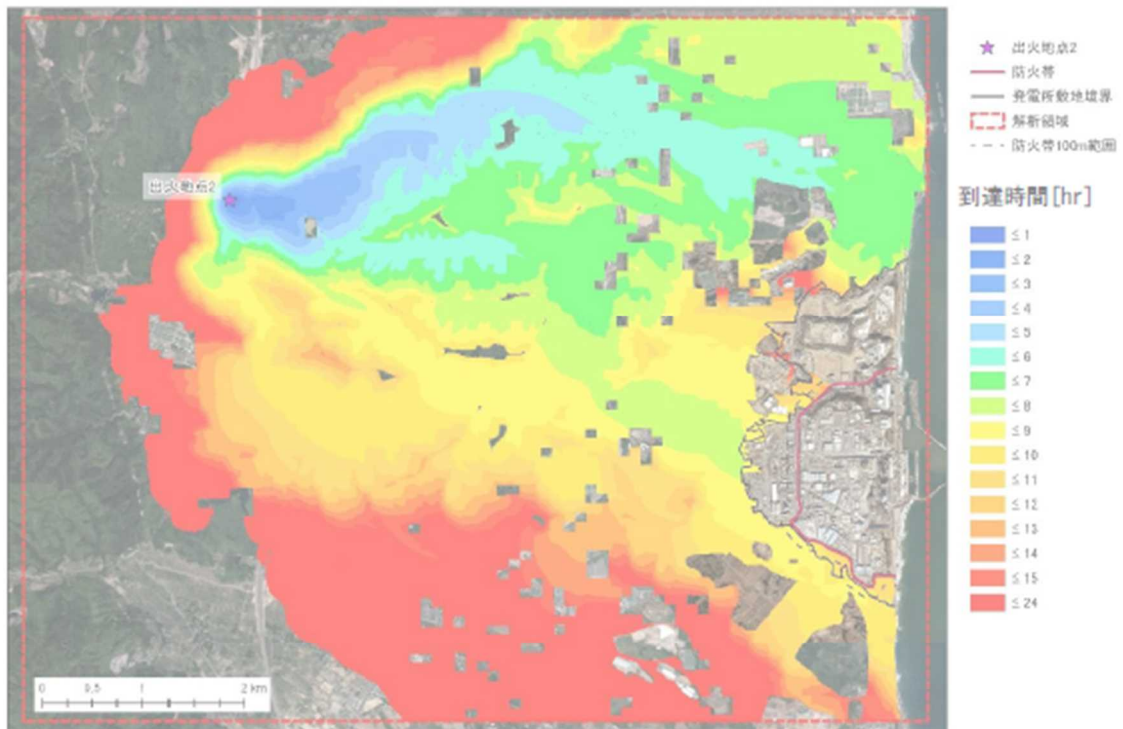


図3-4 ケース2解析結果（南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせ評価中

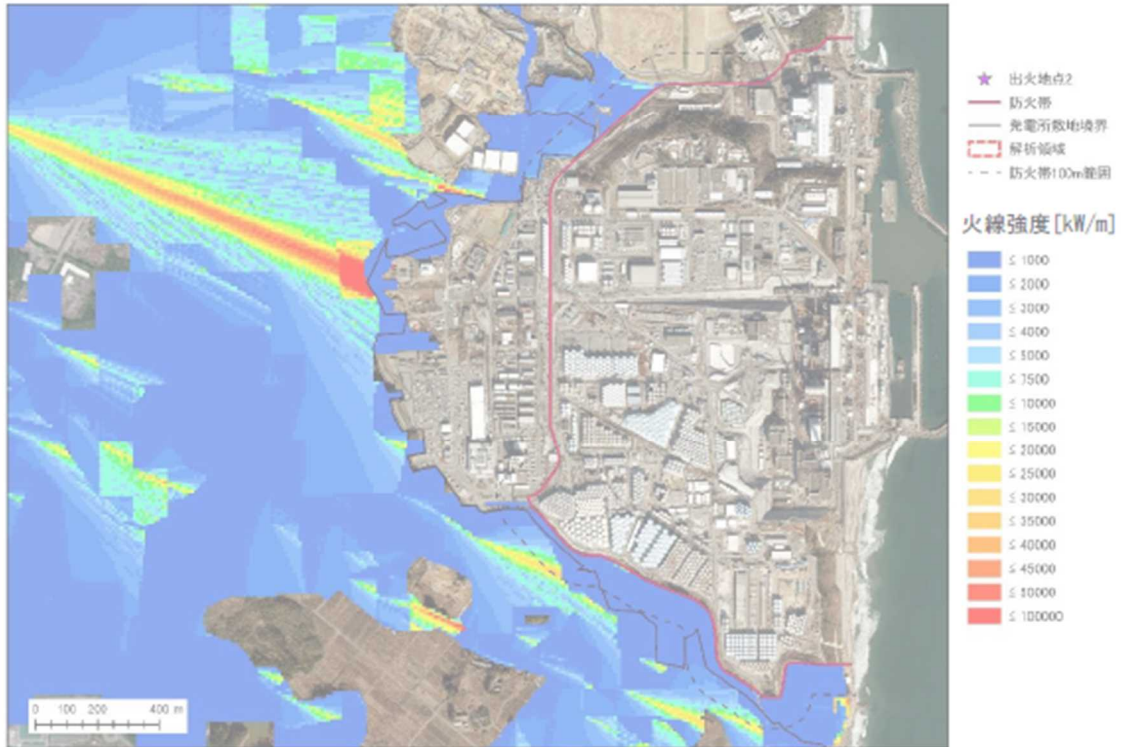
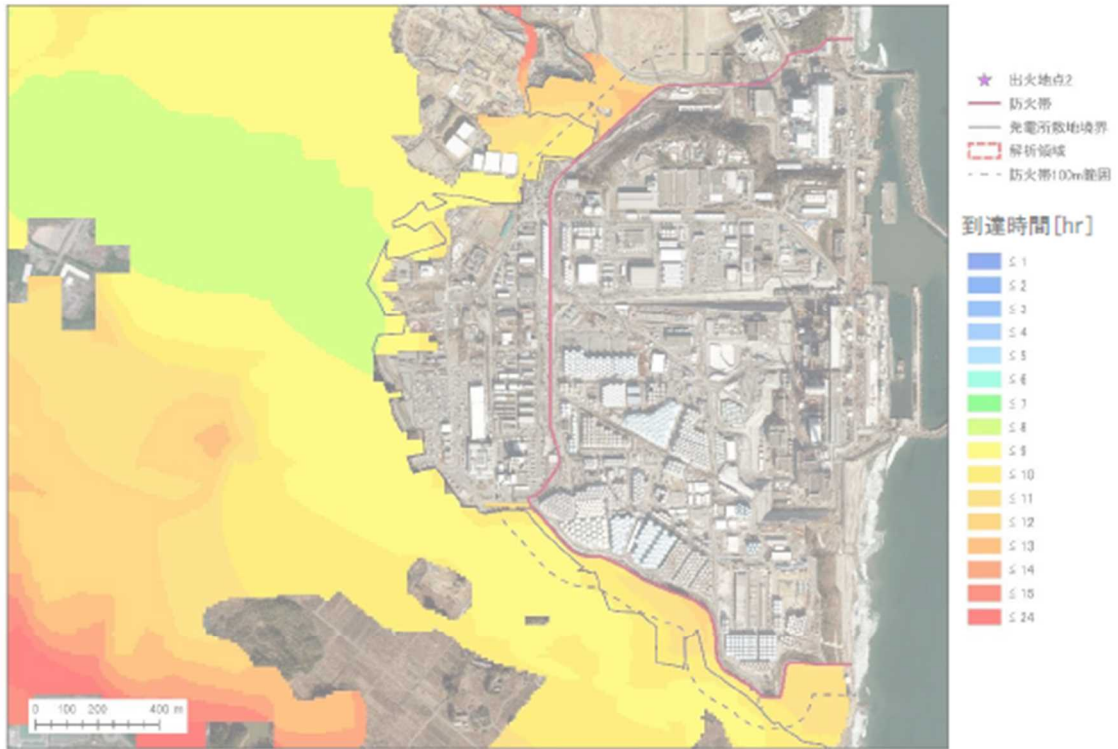


図35 ケース2解析結果(南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
(上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

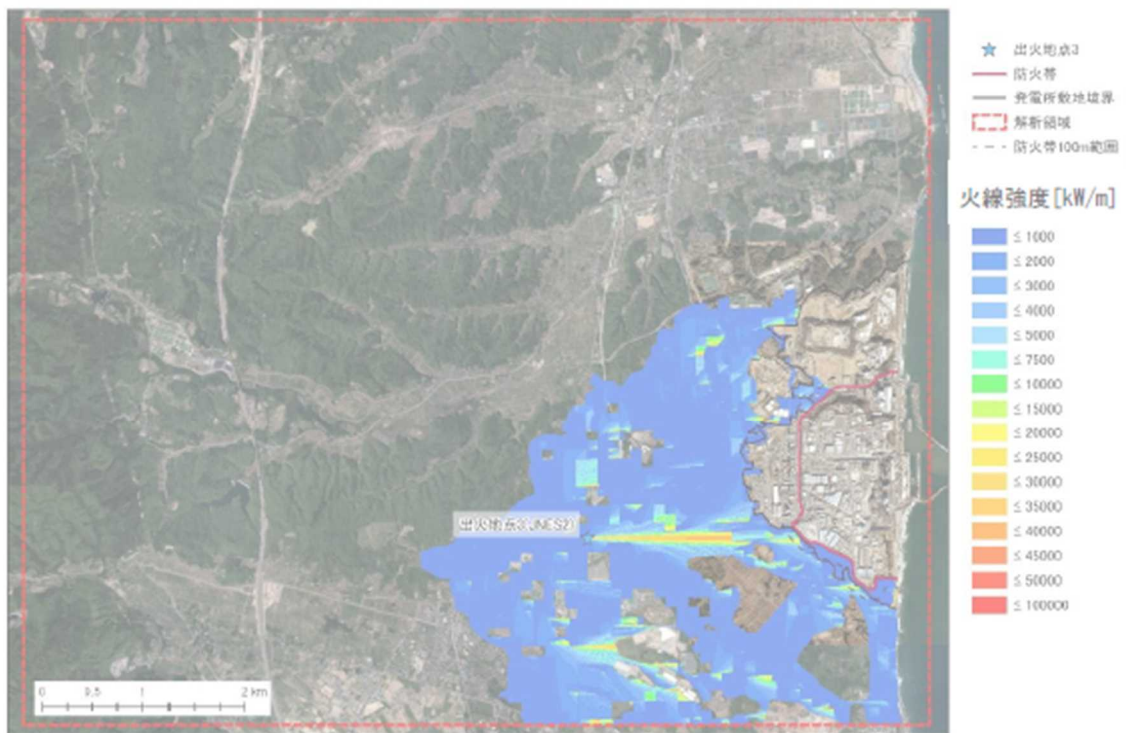
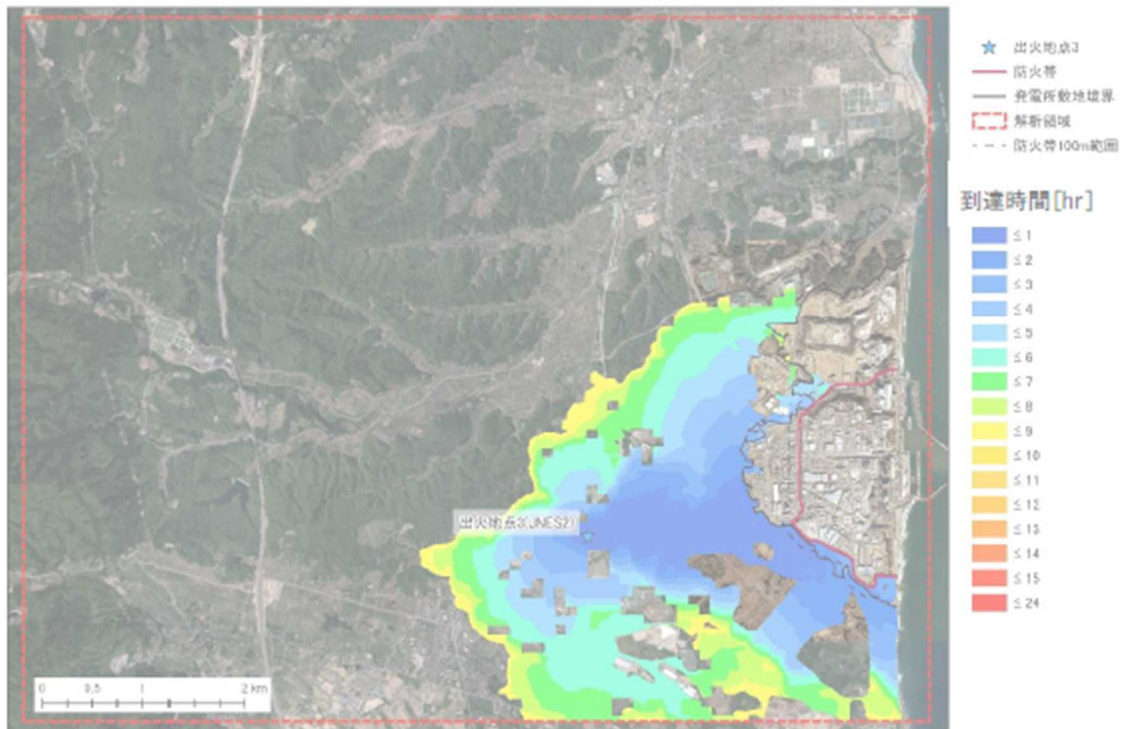


図 3 6 ケース 3 解析結果 (北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)
 (上: 火炎到達時間分布, 下: 火線強度分布)

図は最新の情報に合わせて評価中

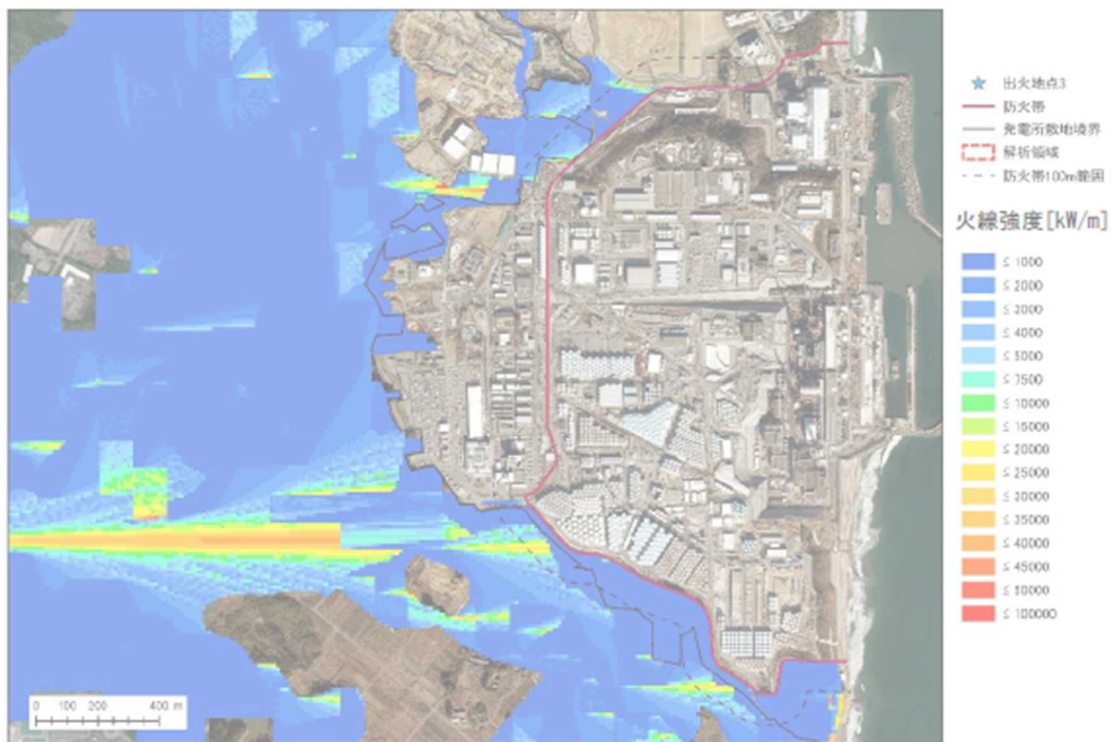


図 3 7 ケース 3 解析結果(北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
 (上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせて評価中

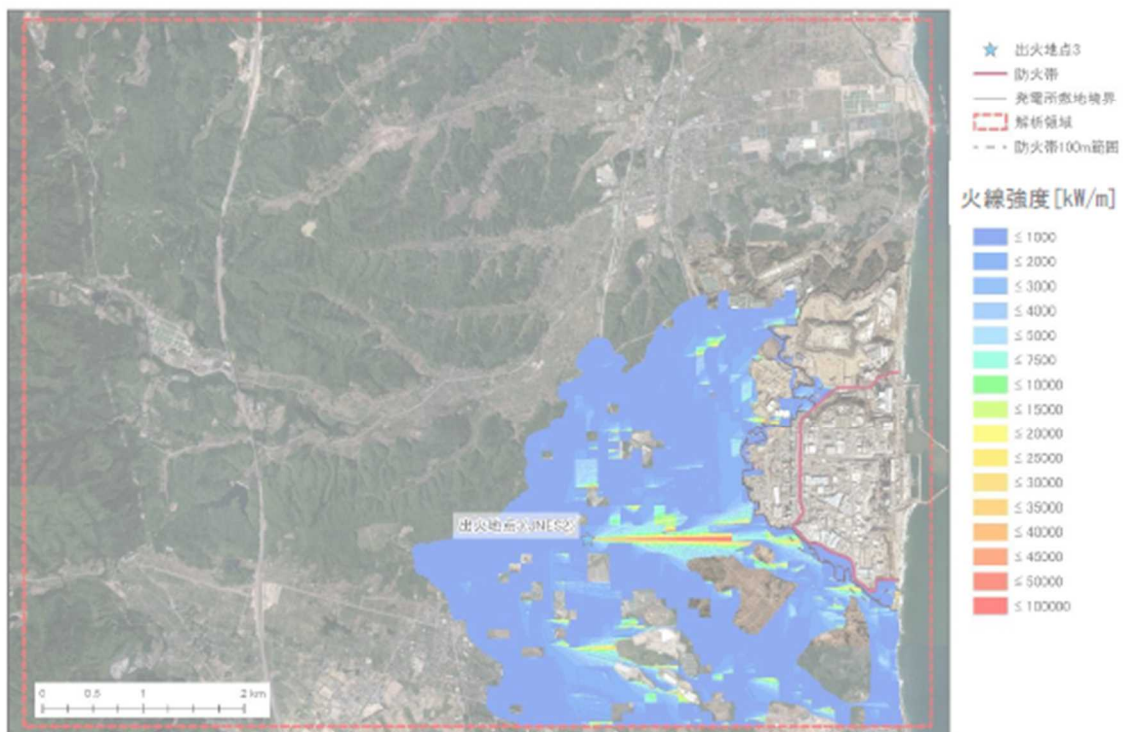
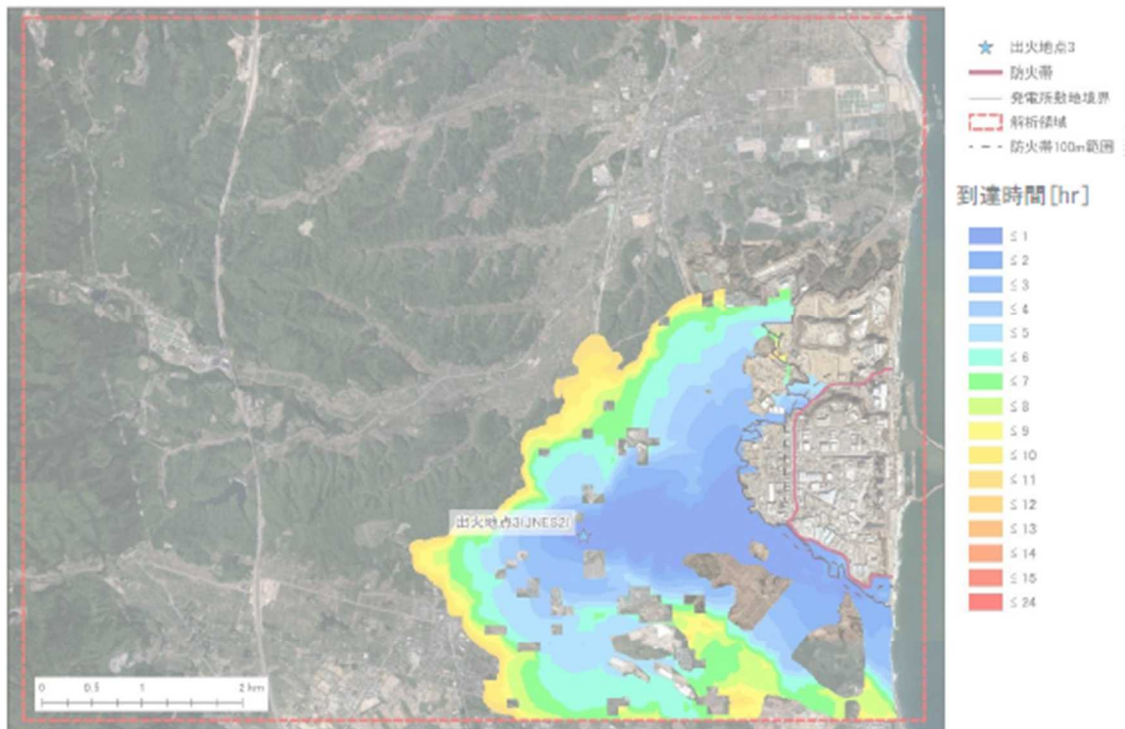


図 3 8 ケース 3 解析結果 (南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)
 (上: 火炎到達時間分布, 下: 火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

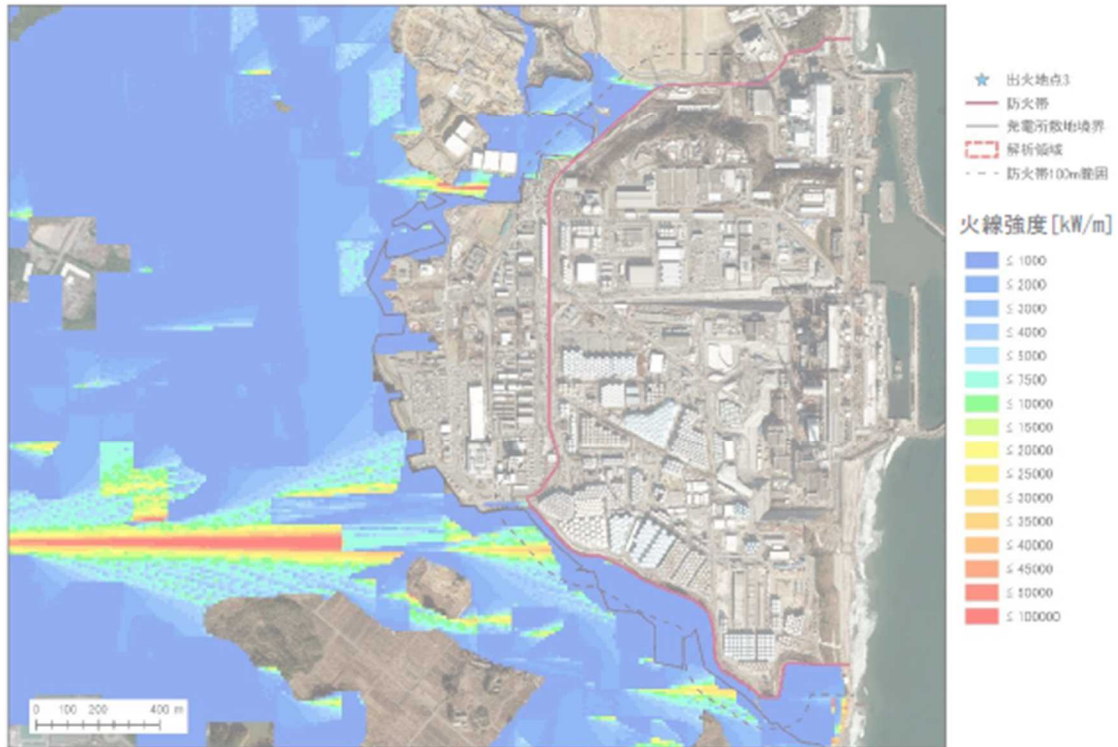


図3-9 ケース3解析結果(南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
 (上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

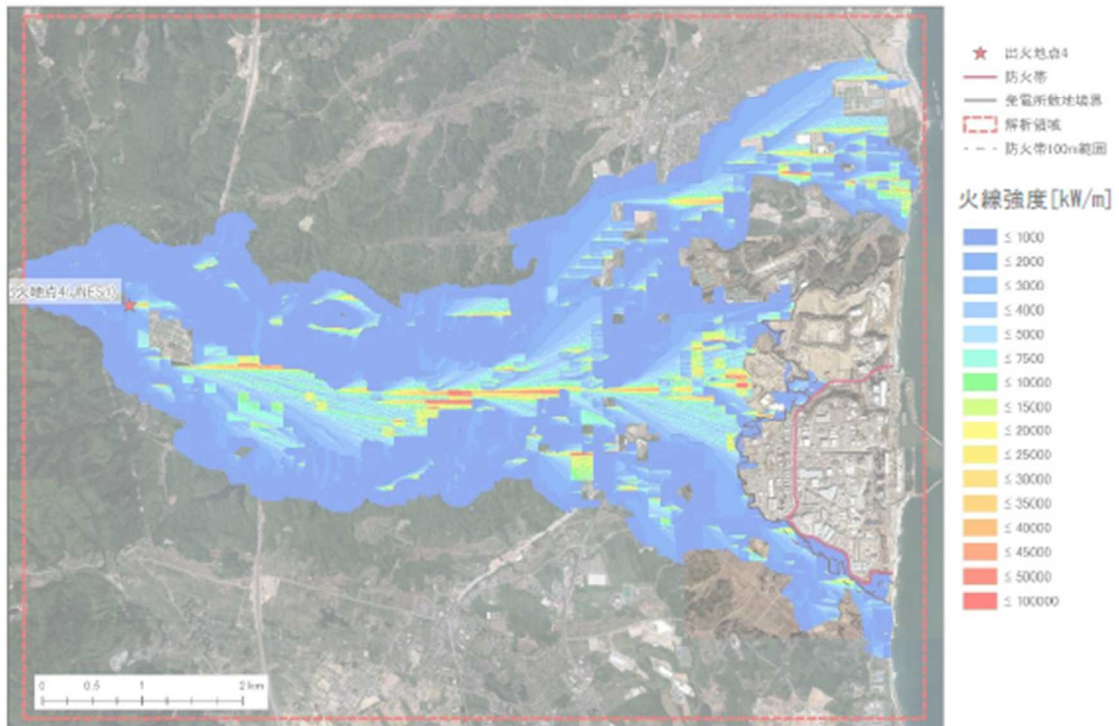
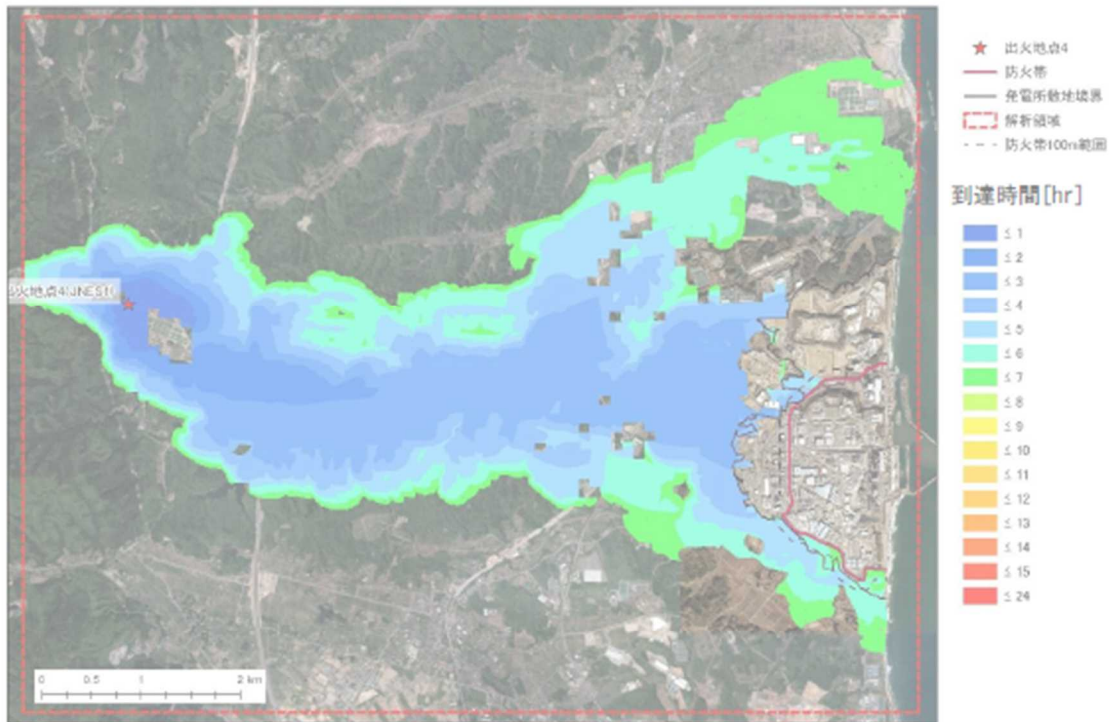


図40 ケース4解析結果（北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせ評価中

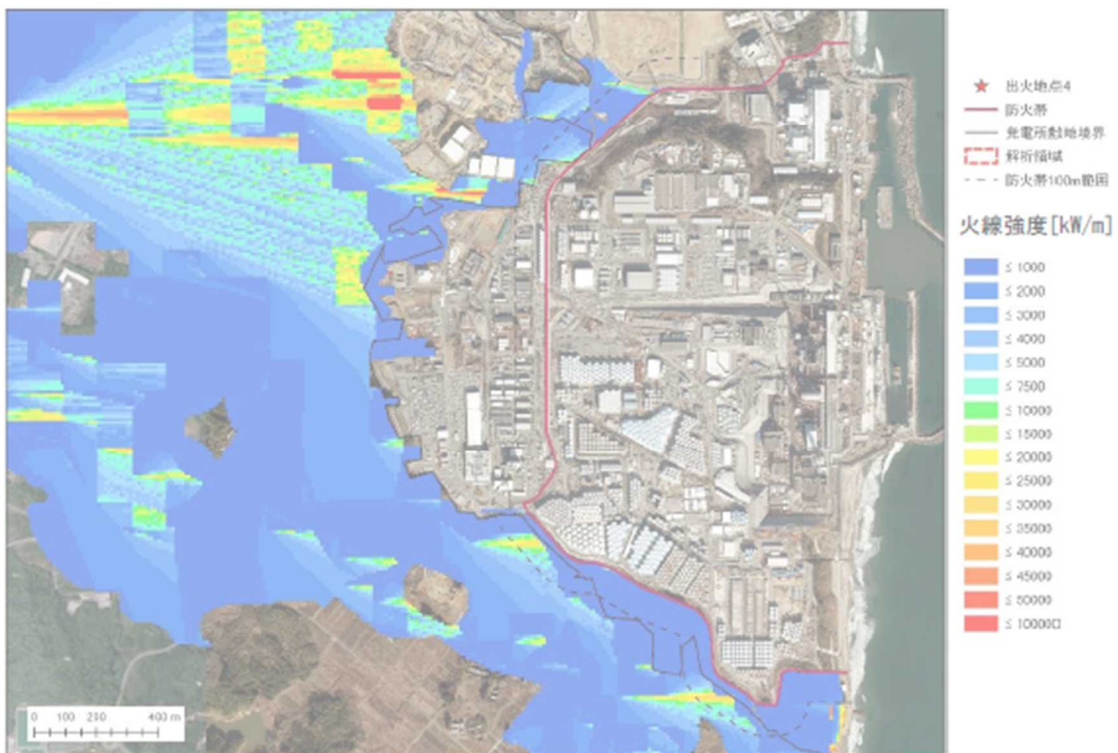
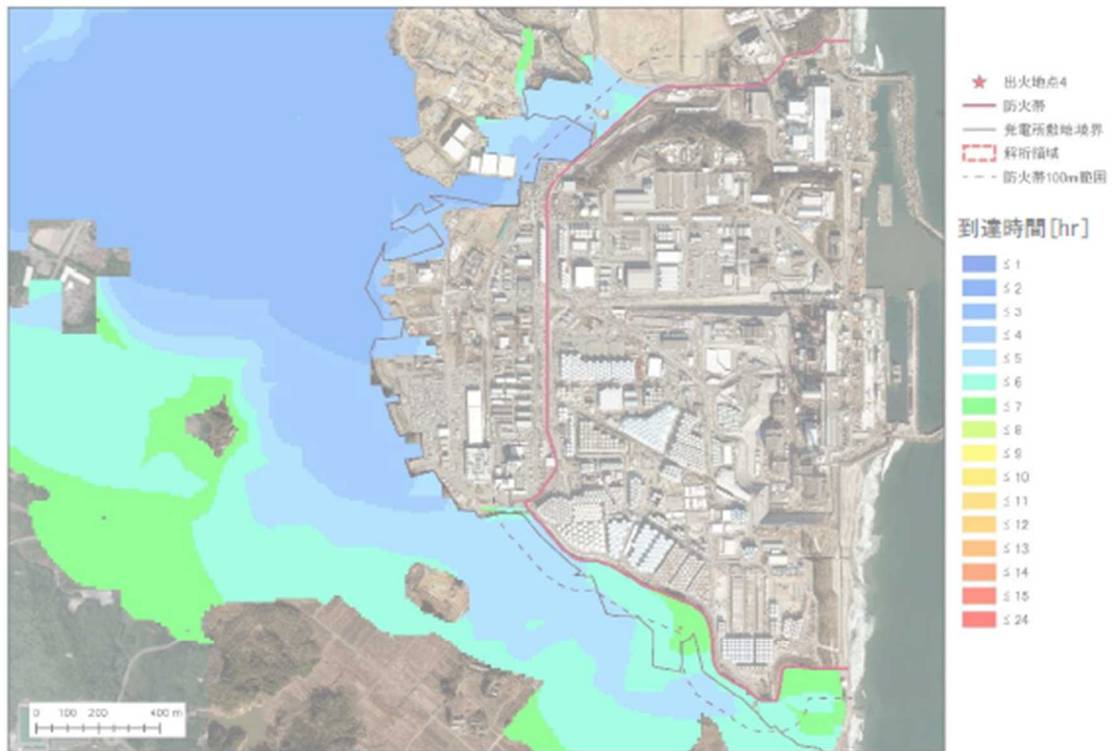


図 4 1 ケース 4 解析結果(北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
(上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

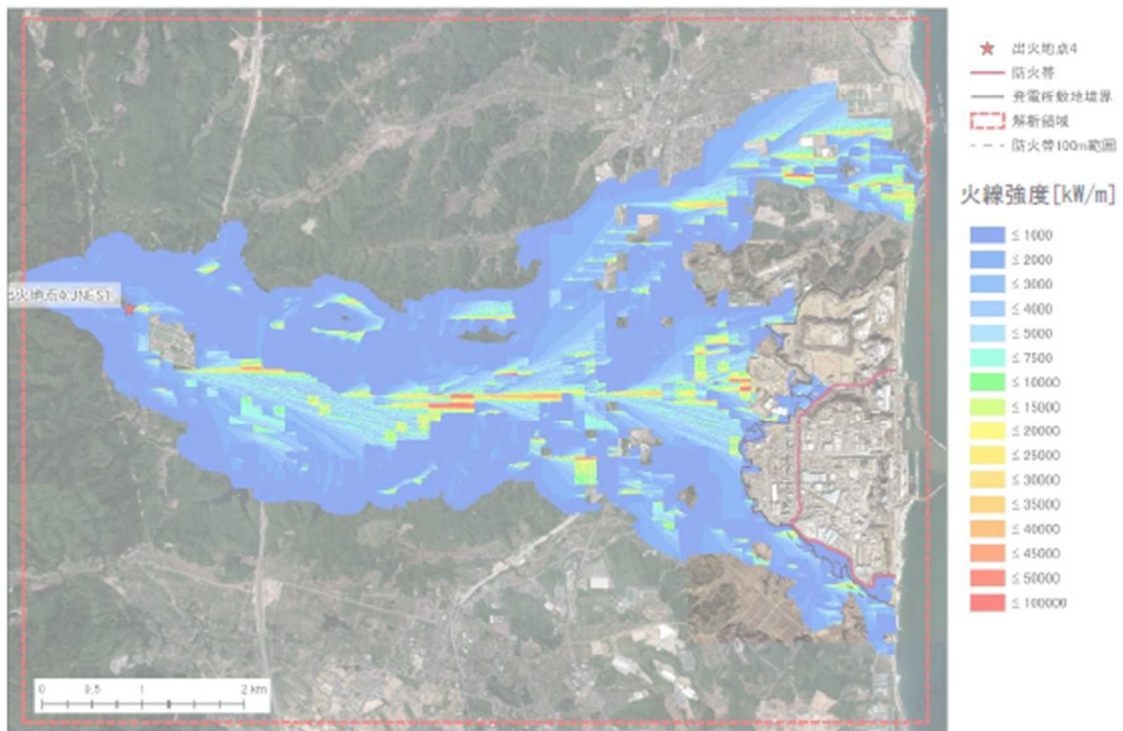
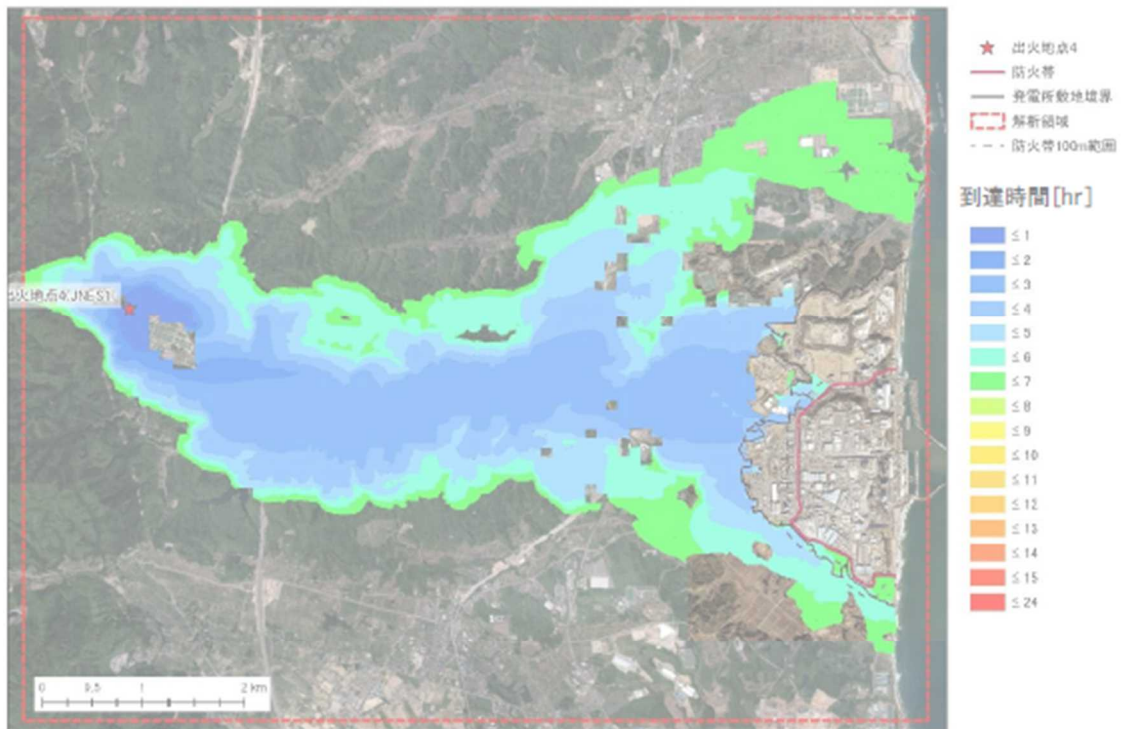


図4-2 ケース4解析結果（南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせ評価中

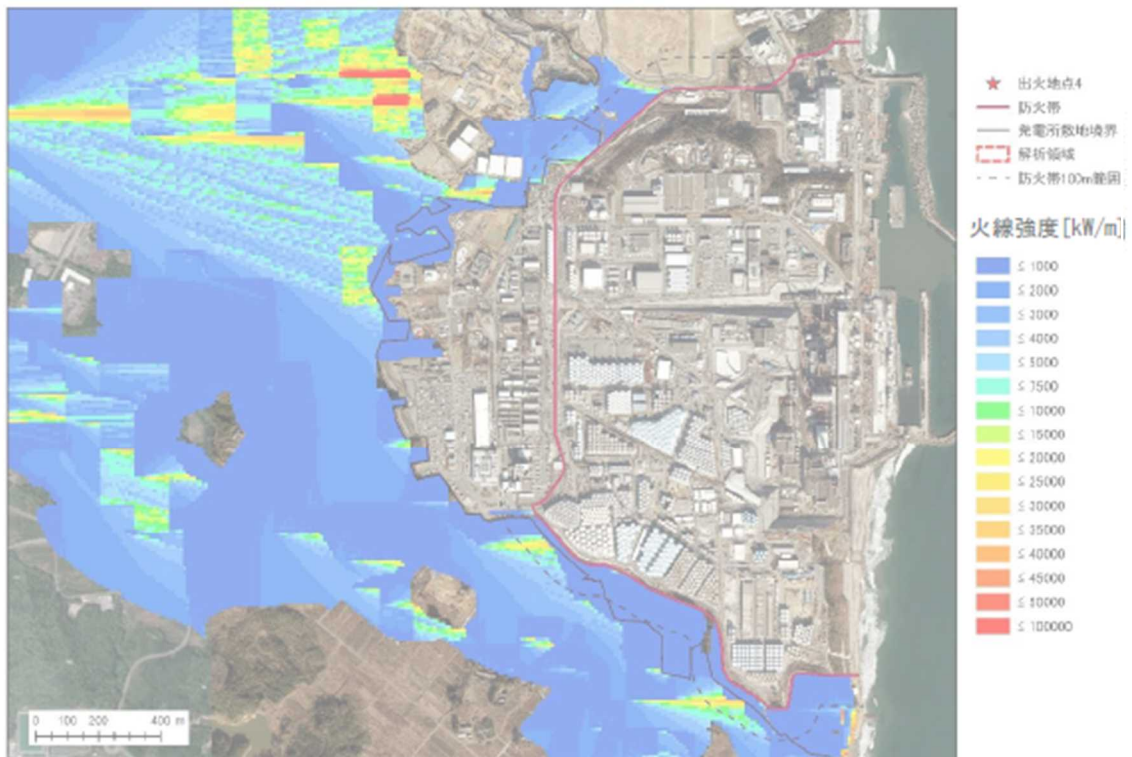


図 4 3 ケース 4 解析結果(南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
 (上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

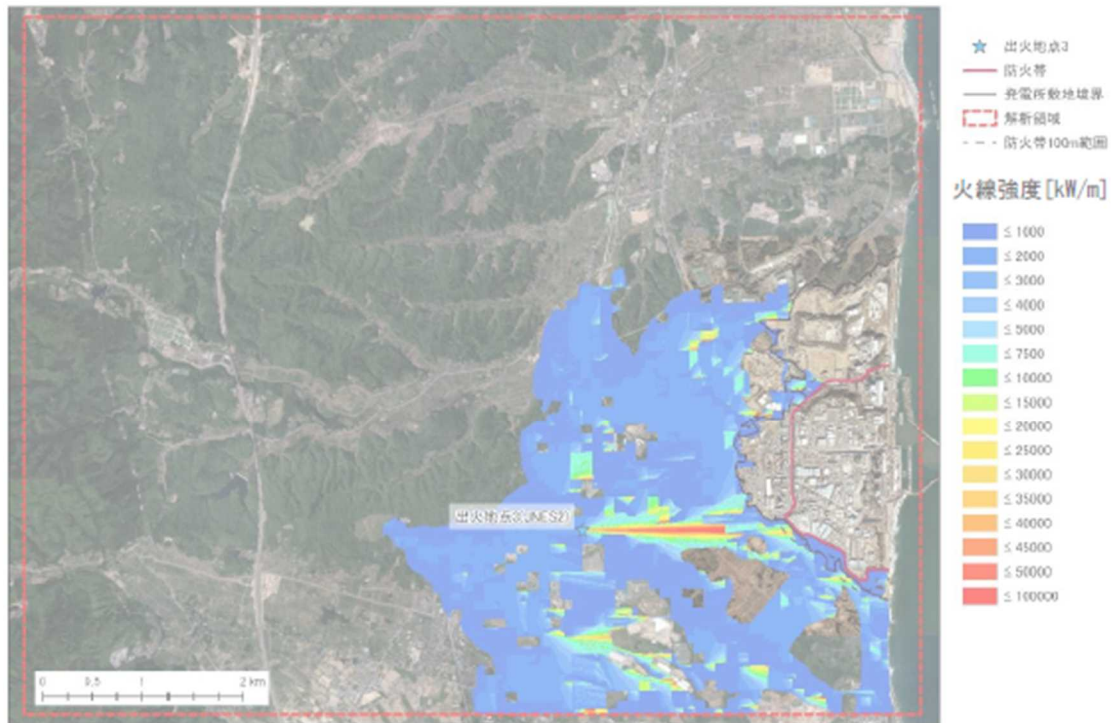
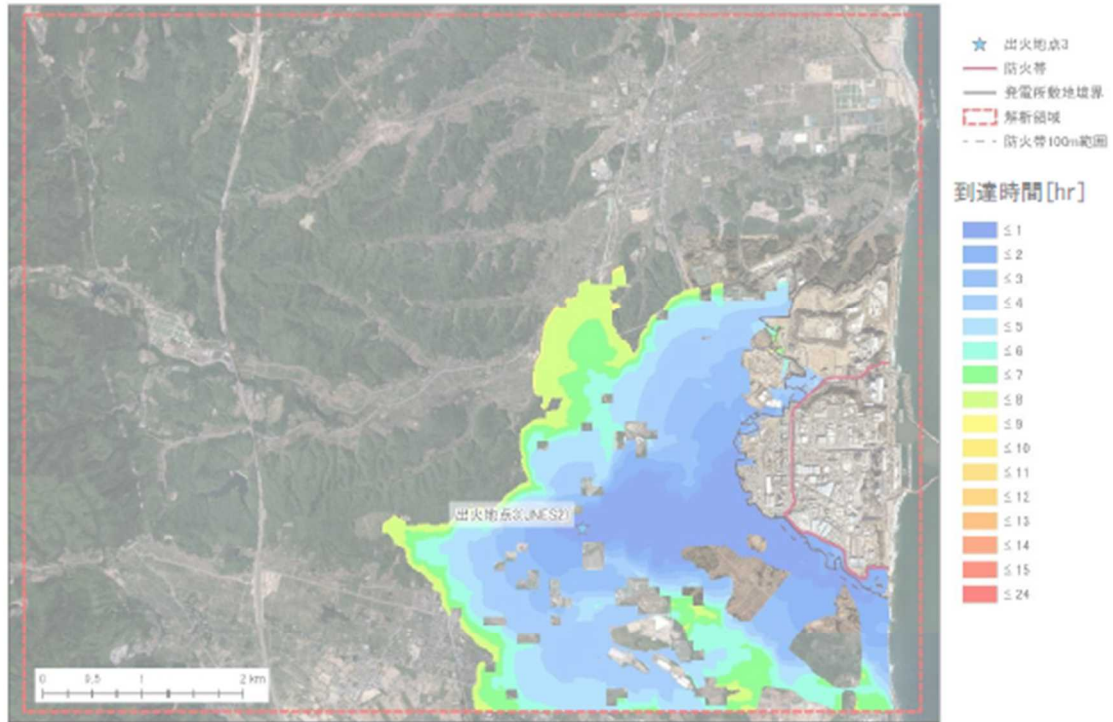


図 4 4 ケース 5 解析結果（北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせ評価中

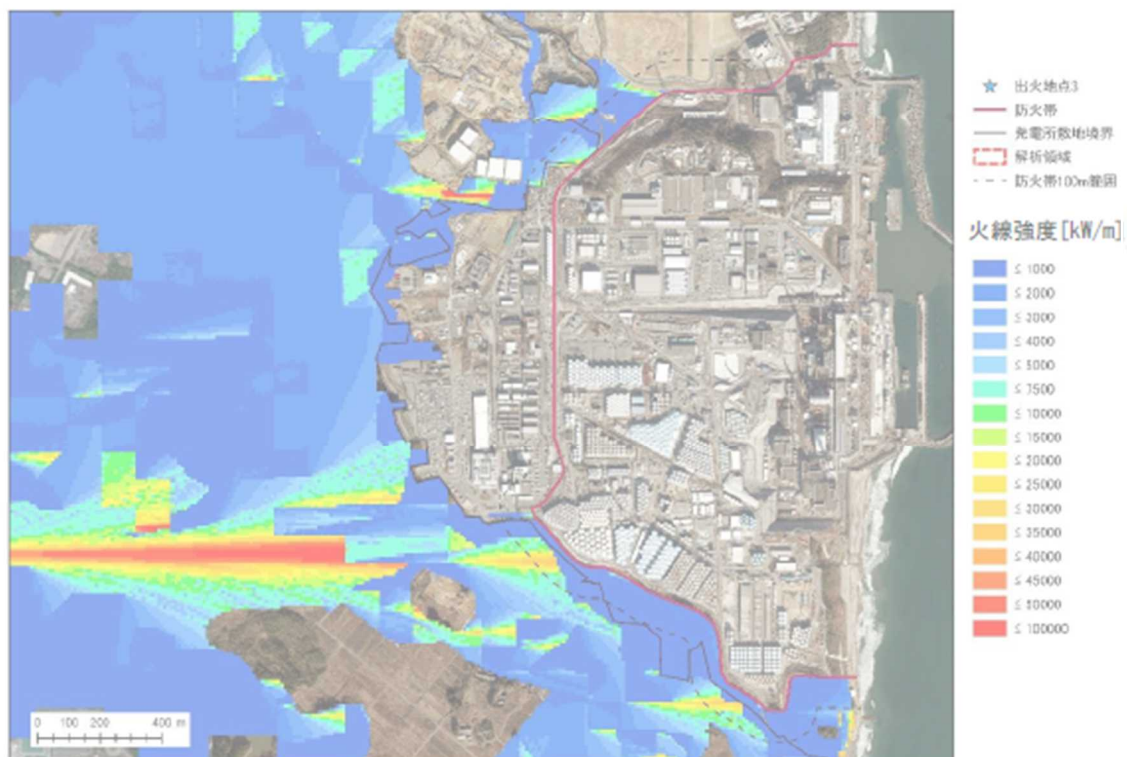


図4-5 ケース5解析結果(北側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
(上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

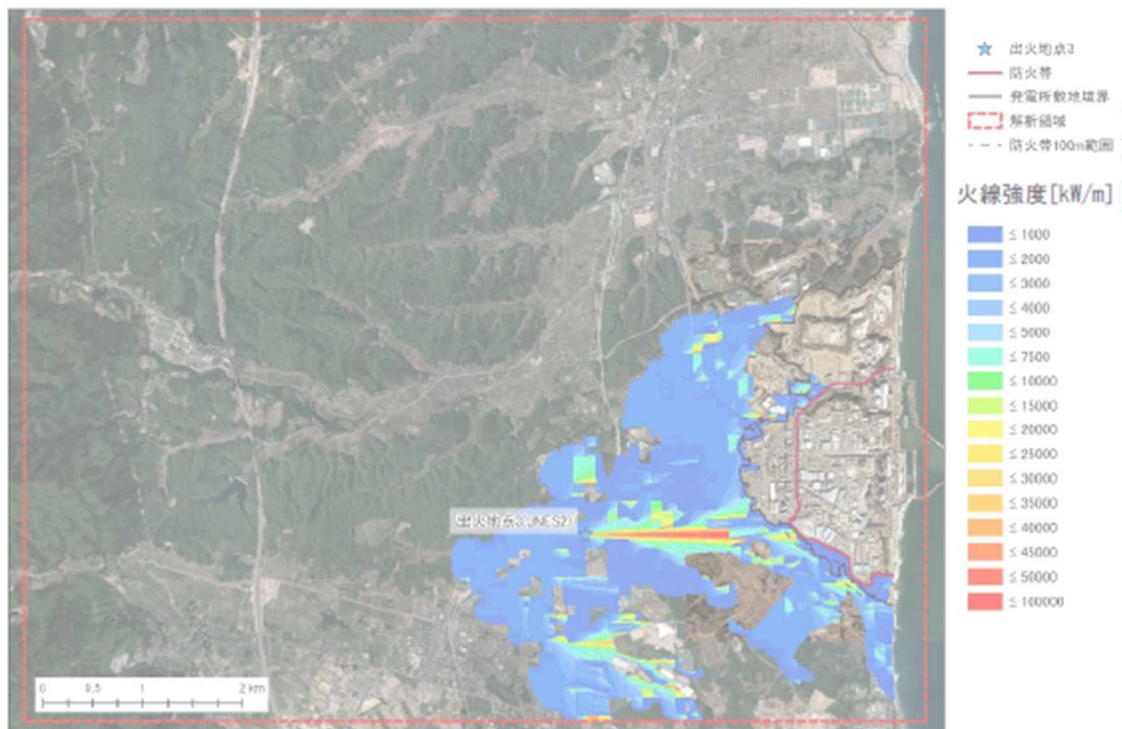
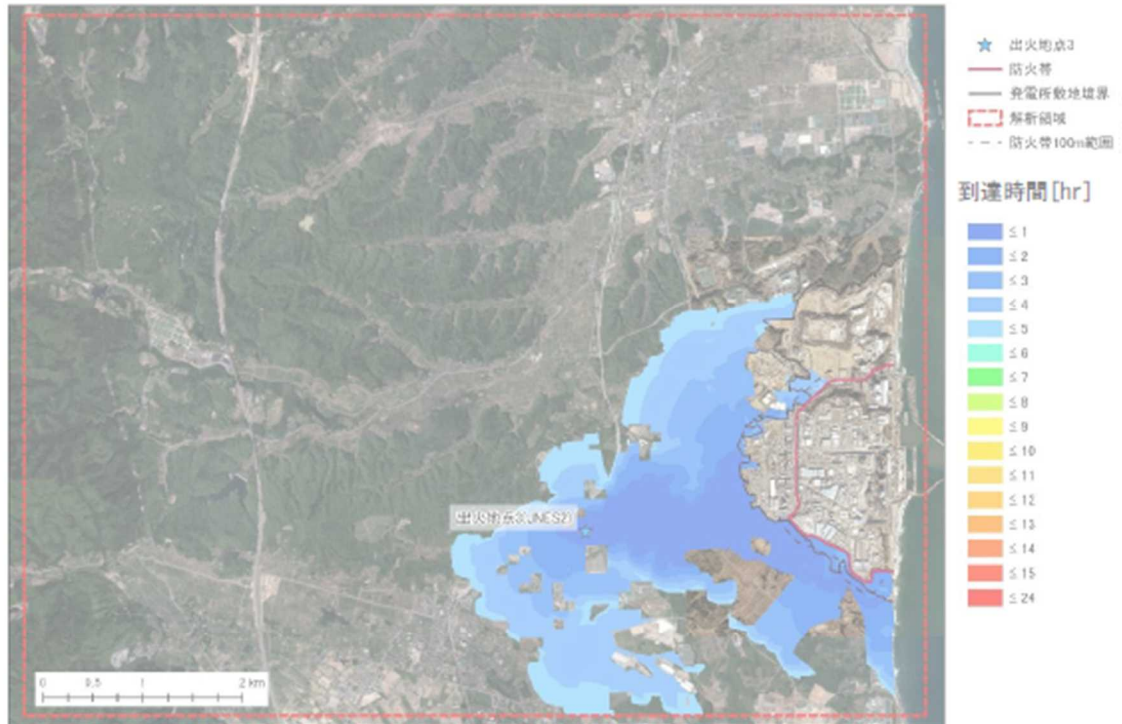


図4.6 ケース5解析結果（南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件）
 （上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）

図は最新の情報に合わせ評価中

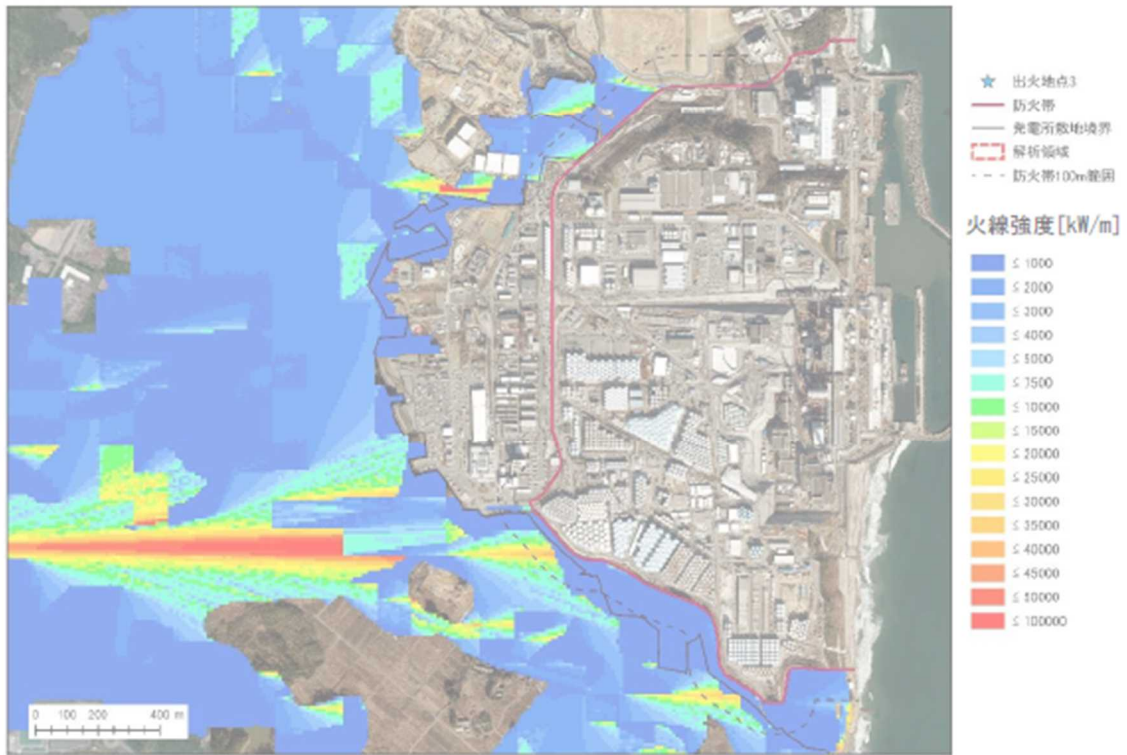


図 4 7 ケース 5 解析結果(南側防火帯近傍における最大火線強度の観測条件)敷地周辺拡大
(上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布)

図は最新の情報に合わせ評価中

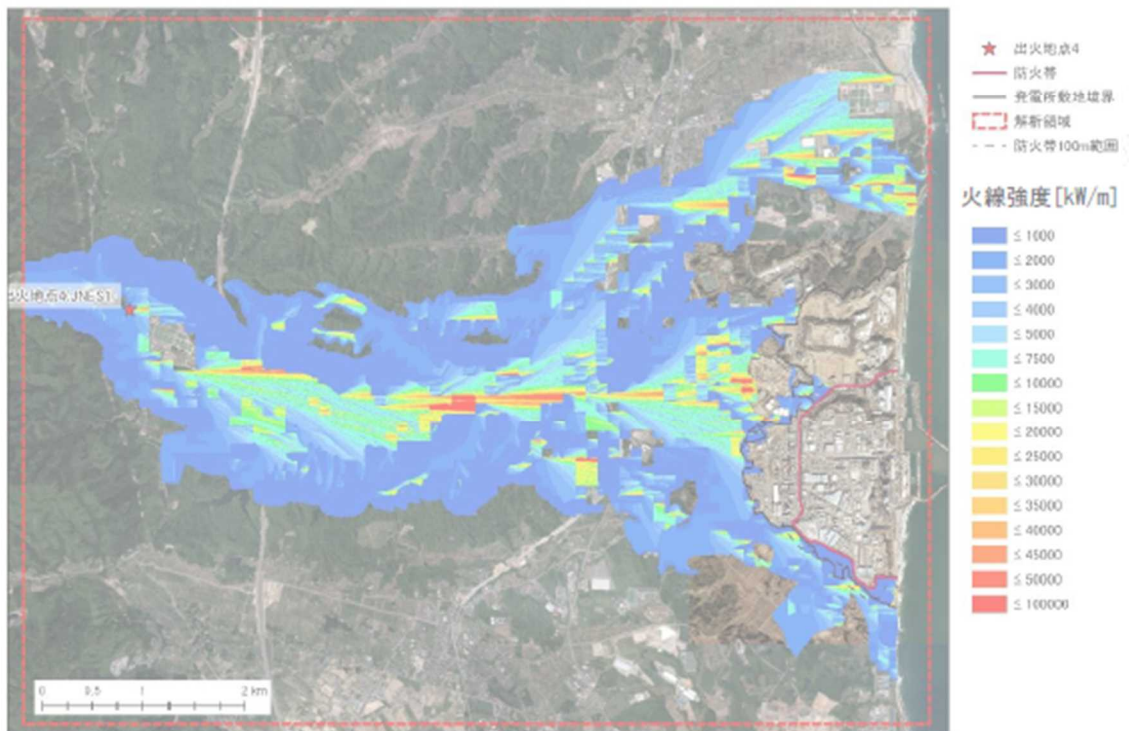
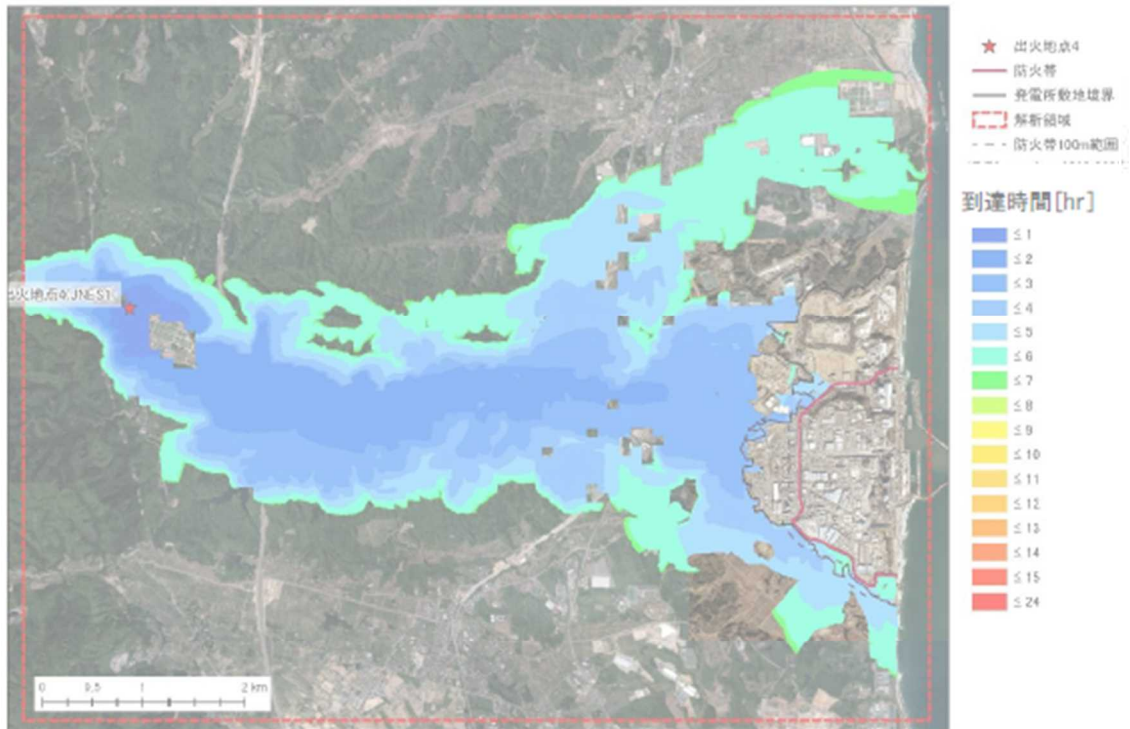


図 4 8 ケース 6 解析結果 (上 : 火炎到達時間分布, 下 : 火線強度分布)

※ケース 6 は同一条件で北側, 南側防火帯近傍の最大火線強度を観測。

図は最新の情報に合わせ評価中

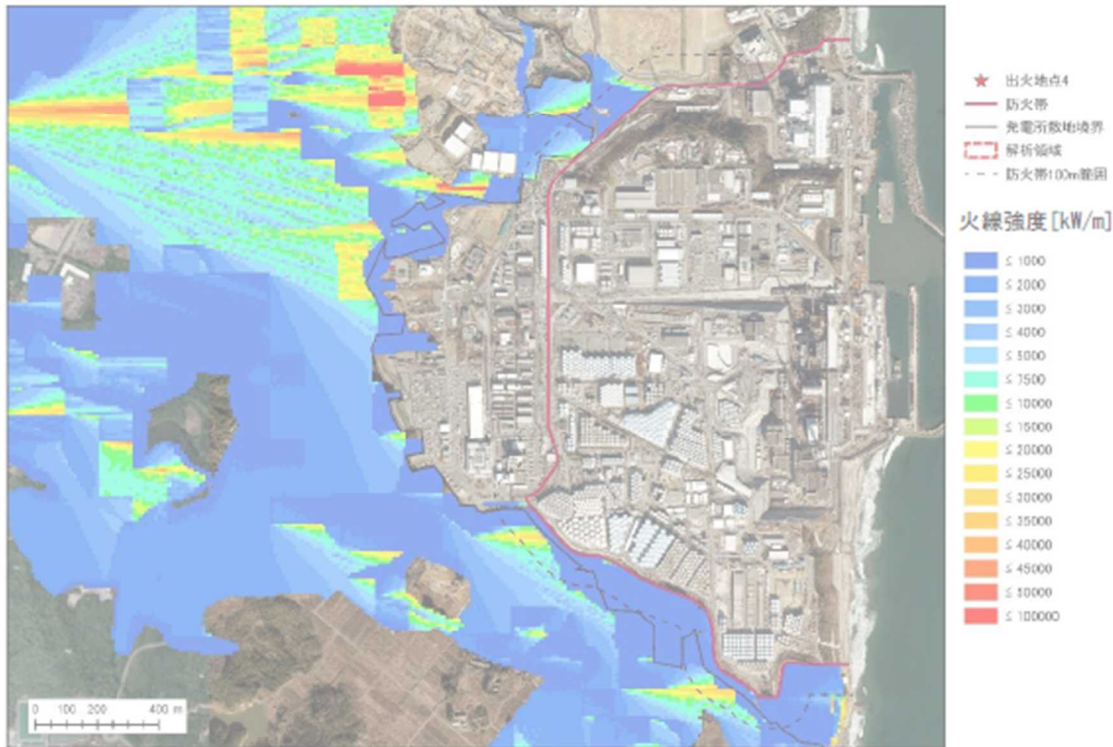


図4-9 ケース6解析結果 敷地周辺拡大（上：火炎到達時間分布，下：火線強度分布）
 ※ケース6 は同一条件で北側，南側防火帯近傍の最大火線強度を観測。

図は最新の情報に合わせて評価中

2.1.2.5 影響評価

FARSITE の解析結果を用いて、コンクリートモジュールに対する森林火災の影響を評価する。評価の手順としては、まず設備の外表面が火災の燃焼継続時間の間に一定強度の輻射を受けると仮定し、表面温度が許容限界温度に達する輻射強度を危険輻射強度として求める。次に、算出された危険輻射強度から逆算した離隔距離を、危険距離として求める。

危険距離の評価後、一定の輻射強度で昇温されるものと仮定して、熱影響評価（温度評価）を実施する。コンクリートモジュールと防火帯間の離隔距離で火災が発生した場合にコンクリートモジュールが受ける熱量を算出し、コンクリートの制限温度を超えることが無いか評価する。

必要データの整備

熱影響評価にあたっては、附属書Aに従い火炎を図50に示すような円筒に近似し、防火帯外縁に円筒火炎モデルを1列に並べる想定とする（図51参照）。この円筒火炎の表面から発せられる輻射（火炎輻射発散度 R_f [kW/m²]) を用いて、設備の受ける輻射を評価する。

まず、図50の円筒火炎（火炎到達幅 W [m]・奥行き D [m]・火炎長 H [m]）を仮定すれば、火線強度 IB [kW/m] が「火炎最前線での単位幅あたりの発熱速度（単位時間当たり発熱量）」と定義される。このとき、火災で発生する発熱量に輻射熱割合 χ （輻射熱に寄与する割合）を考慮し、輻射熱は円筒火炎の側面及び上面から放射されると仮定すると、発熱量の保存から下式(1)が成立する。

$$\begin{aligned} & (\text{円筒火炎1個の側面積} + \text{上面積} [\text{m}^2]) \times \text{円筒火炎個数} [-] \times \text{火炎輻射発散度} [\text{kW}/\text{m}^2] \\ & = \text{火線強度} [\text{kW}/\text{m}] \times \text{火炎到達幅} [\text{m}] \times \text{輻射熱割合} [-] \\ \therefore (2\pi RH + \pi R^2) \times F \times R_f & = IB \times W \times \chi \cdots (1) \end{aligned}$$

式(1)において、附属書Aに従い火炎半径 R [m] = $H/3$ 、円筒火炎の個数 $F = W/2R$ とすると、下式(2)が成立する。

$$R_f = \frac{6\chi IB}{7\pi H} \cdots (2)$$

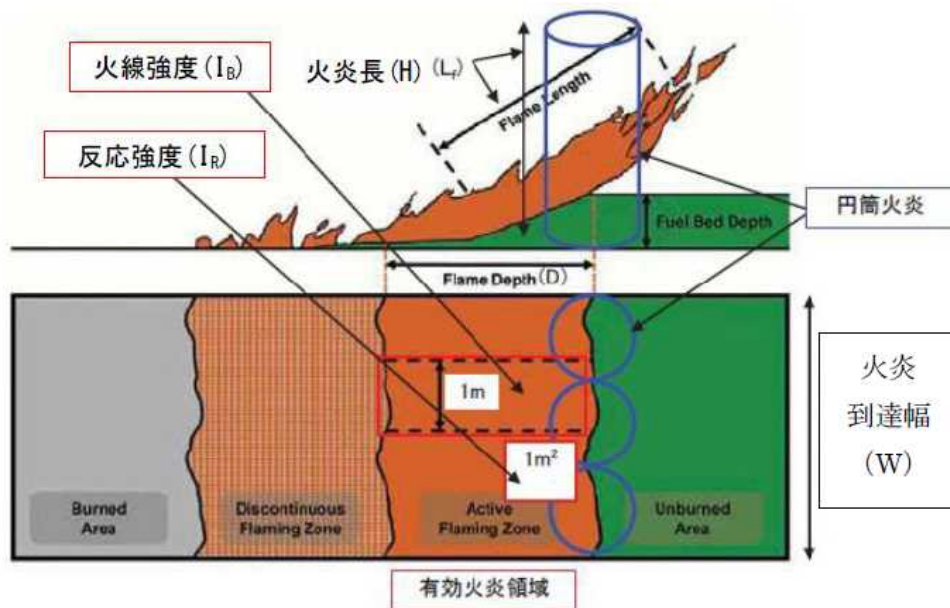
輻射熱割合は、Kサイト評価（参考文献[6]）の設定を踏襲し、下記3種類の値のうち最も大きい値である0.377を使用した。

- ・草地：0.35（米国国立標準技術研究所（NIST）の使用値）
- ・針葉樹：0.377（米国防火技術者協会（SFPE）発行ハンドブック*より算出）
- ・落葉広葉樹：0.371（米国防火技術者協会（SFPE）発行ハンドブック*より算出）

*：THE SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering FOURTH EDITION)

上式を用いて算出した火炎輻射発散度 R_f [kW/m^2] を表 3.6-5 に示す。北側、南側ともに最大火線強度が観測されたケース 3（北側：発火時刻 7：00，南側：発火時刻 10：30）の解析結果を使用している。

なお、1F 西側には新事務本館や協力企業棟等の建造物が多いことから、北側防火帯近傍に南側からの輻射は届きにくいことが考えられる。これを踏まえ、火炎輻射発散度は北側、南側それぞれにおいて別々に算出した。



(出典：Andrews, P.L., et. al. (2011): How to Generate and Interpret Fire Characteristics Charts for Surface and Crown Fire Behavior. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-253.)

図 5 0 円筒火炎モデルと火線強度の概念

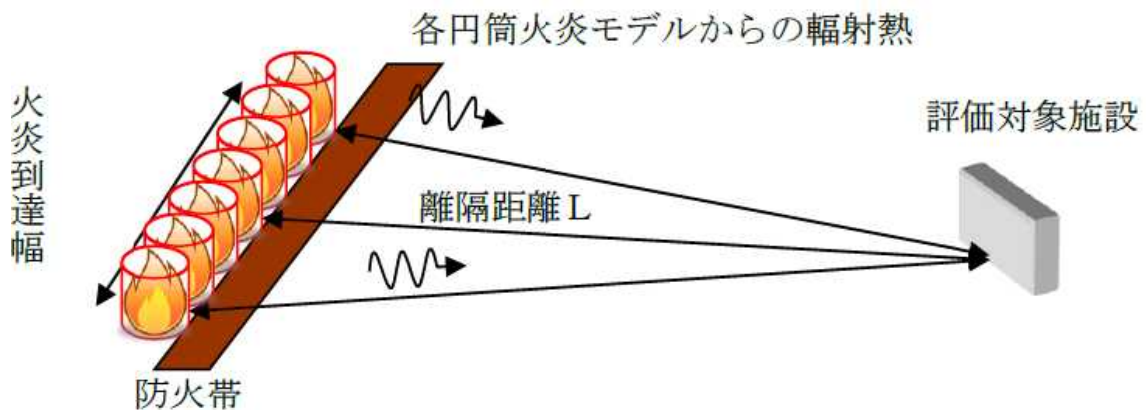


図 5 1 熱影響評価の評価体系（円筒火炎モデルの並べ方）

設定値は最新の情報に合わせ評価中

表 2.7 熱影響評価に使用するパラメーター一覧

データ区分	可燃物モデル		備考
	北側	南側	
火線強度 I_B [kW/m]	17986	36965	FARSITE 解析結果 (ケース 3 ¹⁾) 防火帯近傍 100m 範囲内の最大値
火炎長 H [m]	7.02	9.78	FARSITE 解析結果 (ケース 3 ¹⁾) 最大火線強度観測メッシュにおける値
火炎到達幅 W [m]	1220	1560	北側・南側の防火帯長さ
燃焼継続時間 [分]	11	8	ケース 3 ¹⁾ において, 火炎からの輻射で評価対象設備が熱せられる時間の長さ ²⁾
熱輻射割合 χ [-]	0.377	0.377	K サイト評価 (参考文献[6]) 同様, 草地・針葉樹・落葉広葉樹のうち最大のもの (針葉樹の値) を一律で使用
燃焼半径 R [m]	2.34	3.26	$R=H/3$
円筒火炎モデル数 F [-]	261	239	$F=W/2R$, 整数値に切り上げ
火炎輻射発散度 R_f [kW/m ²]	263.5	388.8	式(2)より算出

1) FARSITE 解析結果のうち, 火線強度が最大となったケース 3 を選択。最大火線強度の値を採用するため, 北側においては発火時刻 7:00, 南側においては発火時刻 10:30 の値を使用。

2) K サイト評価 (参考文献[6]) 同様, 100m ÷ 防火帯近傍 100m 範囲内における延焼速度平均値 で算出。

北側は $100\text{m} \div 9.60\text{m/分} \div 11\text{分}$, 南側は $100\text{m} \div 14.05\text{m/分} \div 8\text{分}$ 。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

危険距離の評価

K サイト評価（参考文献[6]）で使用されていた建屋温度評価体系（図 5 2 参照）を用いて評価を行う。コンクリートモジュールにおける危険輻射強度を算出する。輻射強度 E [kW/m²] を一定とし，下式(3)の一次元非定常熱伝導方程式を用いて，建屋外表面温度がコンクリートの許容限界温度 200°C に達する E を危険輻射強度 E_{\max} [kW/m²] とする。本解析評価においては，有限差分法を使用して式(3)の数値解を求めている。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \dots (3)$$

ここに， T は温度 [°C]， t は時刻 [s]， x は建屋壁内における外面からの距離 [m] である。 α は熱拡散率 [m²/s] であり，コンクリートの熱伝導率 k [W/m・K]，密度 ρ [kg/m³]，比熱 c [J/kg・K] から下式(4)で算出される。上述の設備の評価に使用するパラメータ（内外表面熱伝達率，熱伝導率，密度，比熱，熱拡散率，吸収率，外気温度）を表 2 8 に示す。

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \dots (4)$$

次に，危険輻射強度から危険距離を算出する。火炎輻射発散度 R_f [kW/m²] の円筒火炎から離隔距離 L_t [m] だけ離れた受熱点が受ける輻射強度 E [kW/m²] は下式(5)で表される。

$$E = R_f \cdot \phi \dots (5)$$

ここに， ϕ は形態係数（無次元）である。森林火災影響評価の場合，火炎到達幅 W [m] の分だけ円筒火炎モデルが横一列に F 個（ $F=W/2R$ ）だけ並ぶものと仮定して評価を行う

（図 5 1 参照）。そのため式(5)の形態係数 Φ は，下式(6)に示すように円筒火炎 F 個分の形態係数の総和となる（図 5 3 参照）。

$$\Phi = \phi_1 + 2 \times \sum_{i=2}^{(F-1)/2} \phi_i \dots (6)$$

なお，受熱点から離隔距離 L_i [m] の位置にある任意の円筒火炎 1 個の形態係数 ϕ_i は火炎長 H [m] と離隔距離 L_i の関数として下式(7)で算出される。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

$$m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2 \dots (7)$$

円筒火炎の火炎輻射発散度 R_f の値が表 2 7 に示した値（北側で 263.5 kW/m^2 ）で一定のとき、前頁で算出した危険輻射強度 $E_{max}[\text{kW/m}^2]$ とすると、下式(8)が成立する。式(8)を用いて、 $\phi > \phi_t$ となる最大の距離 L_t を危険距離として算出する。

$$E_{max} = R_f \cdot \phi_t \cdot \dots (8)$$

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

コンクリートモジュールの危険距離評価結果を表 2 9 に示す。想定される森林火災において、評価上必要とされる危険距離（約 87m ）に対し、1F 防火帯の外縁（火炎側）からコンクリートモジュールまでの間の離隔距離が危険距離以上であることを確認した。

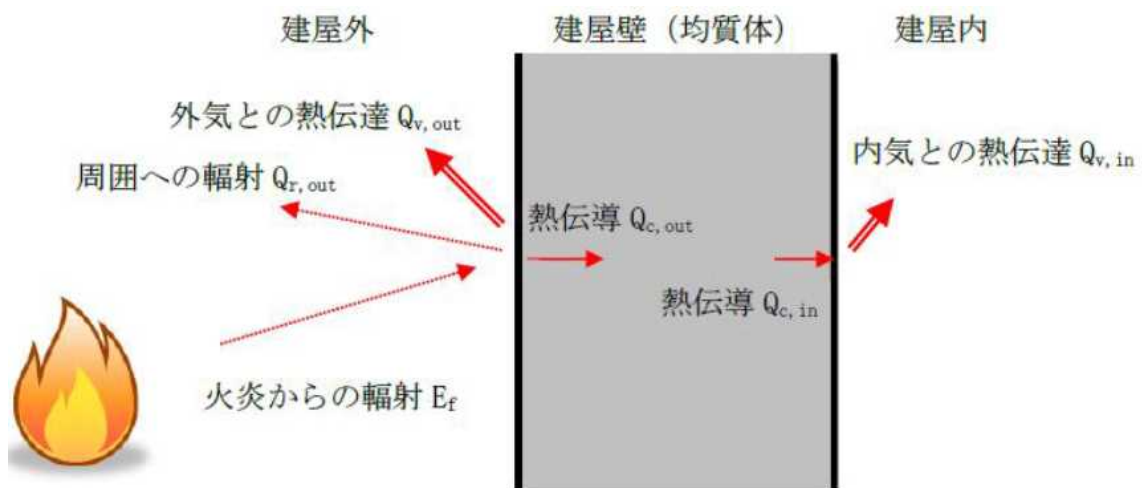


図 5 2 コンクリートモジュール温度評価体系図

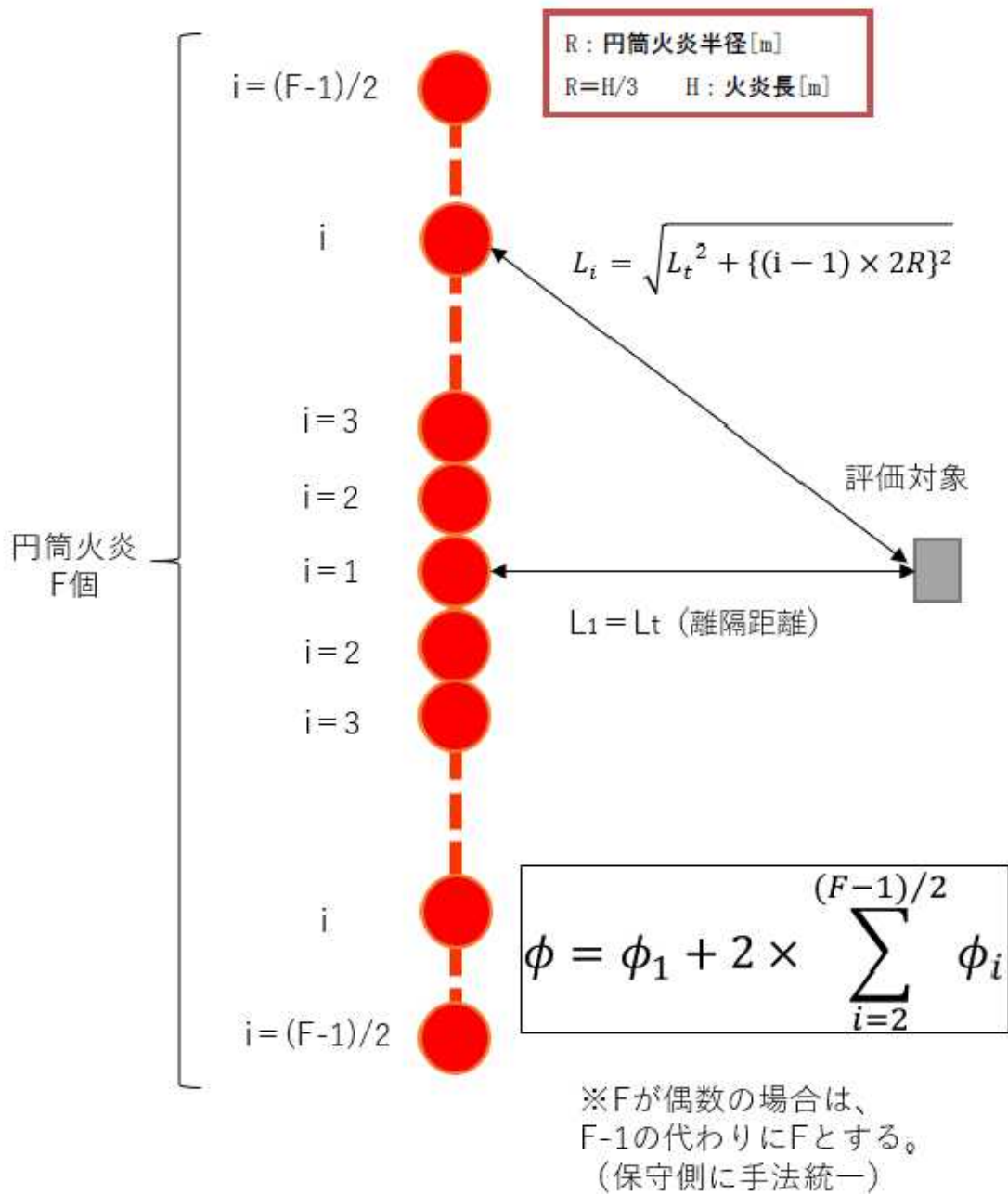


図 5 3 形態係数の算出イメージ

表 2 8 熱影響評価の評価用パラメータ

パラメータ	値	設定方法
外表面熱伝達率 $h_{out} [W/m^2 \cdot K]$	63.813	Kサイト評価（参考文献[6]）同様，Jurges の式より算出。 ($h_{out} = 7.2 \times U^{0.78}$ ，風速 $U = 16.4m/s$)
内表面熱伝達率 $h_{in} [W/m^2 \cdot K]$	8	夏季に垂直壁内面において一般的に使用される値（空気調和ハンドブック（参考文献[14]）より）。
熱伝導率 $k [W/m \cdot K]$	1.2	一般的な石灰岩質コンクリートの値を使用（伝熱工学資料（第5版）（参考文献[15]）より）。
密度 $\rho [kg/m^3]$	2400	
比熱 $c [J/kg \cdot K]$	900	
外面放射率（吸収率） $\varepsilon [-]$	0.94	
熱拡散率 $\alpha [m^2/s]$	5.56×10^{-7}	式(4)を用いて，熱伝導率，密度及び比熱から算出。
外気温度 $T_{out} [^\circ C]$	50	Kサイト評価（参考文献[6]）同様，外壁面の相当外気温（約 $41^\circ C$ ）を切り上げた値 ¹⁾ 。

1) 空気調和ハンドブック（参考文献[14]）より，相当外気温は下式で算出可能。

相当外気温 = (吸収率/外表面熱伝達率) × 日射量 + 外気温度

吸収率及び外表面熱伝達率は表 2 8 記載の値，外気温度は FARSITE 解析に使用した気温

34℃とした。日射量は，空気調和ハンドブック（参考文献[14]）より，東京の7月23日10時～14時における垂直外壁面の日射量の最大値約 500W/m²を使用した。

設定値及び評価値は最新の
の情報に合わせ評価中

表 2 9 コンクリートモジュールの評価結果

パラメータ	値
壁厚[m]	0.2 ¹⁾
内気温度[°C]	41 ²⁾
危険輻射強度[kW/m ²]	19.67 ³⁾
形態係数φ[-]	0.0746 ³⁾
危険距離 Lt[m]	87 ³⁾
離隔距離 L[m]	190 ⁴⁾

- 1) 1F 実施計画 2.13 乾式キャスク仮保管設備 II-2-13-8 より抜粋。
- 2) 1F 実施計画 2.13 乾式キャスク仮保管設備 II-2-13 添 4-42 より、コンクリートモジュールの排気温度は最大で 40.3°C であるため、整数値に切り上げる。
- 3) 火炎到達幅 220m, 火炎輻射発散度 263.5kW/m², 燃焼継続時間 11 分 (表 2 7 中の北側防火帯の値) を使用して算出。
- 4) 本評価で設定した防火帯内側からの離隔距離。実際のキャスク仮保管設備の西端から防火帯外側までの距離は約 308m である。図 5 4 参照。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

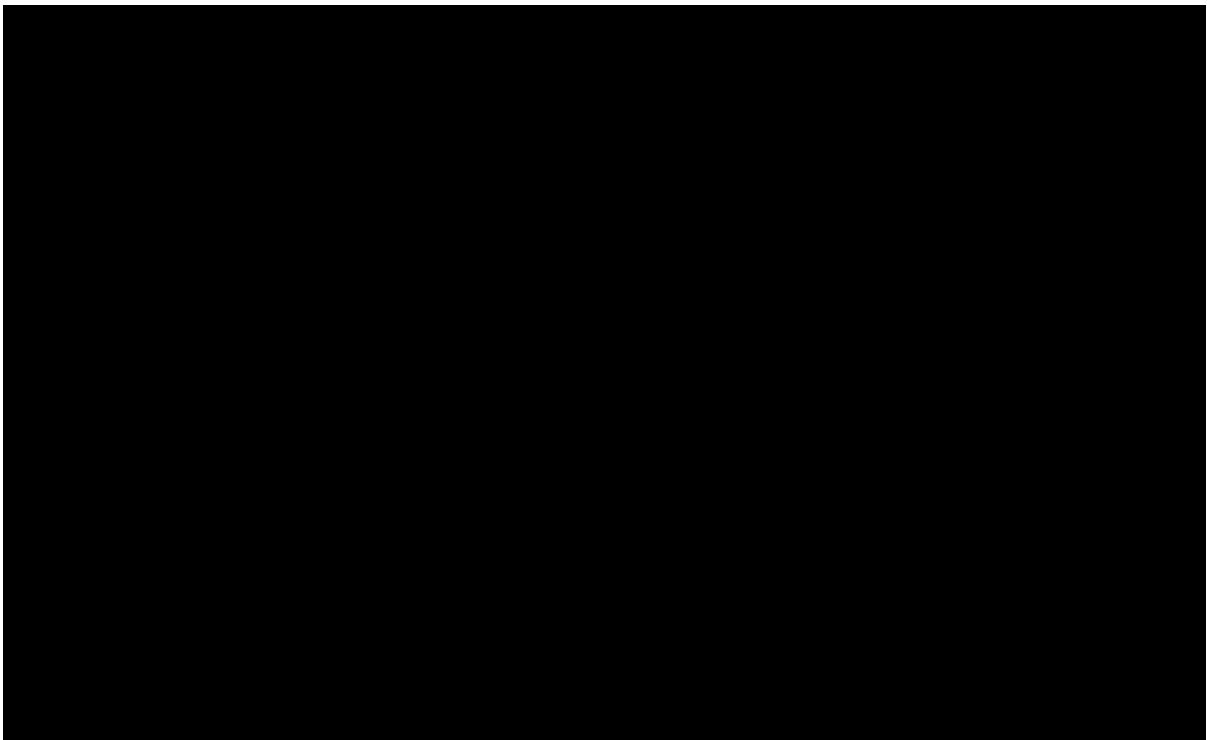


図 5 4 コンクリートモジュールと防火帯の離隔距離

図は最新の情報に合わせ評価中

熱影響の評価

前項にて危険距離に対し十分な離隔距離があることから、コンクリートモジュールが生気温度の 200℃に達することは無いことを確認した。ここで、森林火災が発生した場合にコンクリートモジュールが何℃まで温度上昇するかを評価する。

一定の輻射強度で昇温されるものと仮定して、熱影響評価結果（温度評価）を実施する。コンクリートモジュールは北側防火帯近傍に位置することから、北側防火帯近傍の火炎輻射発散度を使用する。図 5 2 に示した建屋温度評価体系を用いて、下式(8)の 1 次元の非定常熱伝導方程式により温度評価を行う。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \dots (8)$$

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

評価の結果、コンクリートモジュールは制限温度の 200℃に到達することはないことを確認した。コンクリートモジュールの評価結果を表 3 0 に、燃焼継続時間 **11** 分後の外壁面・内壁面温度の変化を図 5 5 に示す。

コンクリートモジュール内部のキャスク本体に対する熱影響についても併せて評価する。キャスクへの熱影響は、中性子遮蔽材としての機能を持つレジンが熱影響により制限温度に到達するかを評価する。

レジンが熱分解反応を起こし遮蔽材としての機能を損なう温度は 220℃以上であるため、キャスク表面が 220℃に到達しなければレジンへの影響は無いといえる。表 3 0 の通り、森林火災発生時のコンクリートモジュール内表面温度は **42**℃であり、キャスク表面の温度が 220℃に到達することは無いといえることから、キャスク本体に対する森林火災の熱影響は無い。

表 3 0 コンクリートモジュールの熱影響評価結果

パラメータ	値	設定方法	
外表面熱伝達率 h_{out} [W/m ² ・K]	63.813	表 2 8 参照	
内表面熱伝達率 h_{in} [W/m ² ・K]	8		
熱伝導率 k [W/m・K]	1.2		
密度 ρ [kg/m ³]	2400		
比熱 c [J/kg・K]	900		
外面放射率 (吸収率) ϵ [-]	0.94		
熱拡散率 α [m ² /s]	5.56×10^{-7}		
外気温度 T_{out} [°C]	50		
内気温度 T_{in} [°C]	41		表 2 9 参照
壁厚 L [m]	0.2		
火炎輻射発散度 R_f [kW/m ²]	263.5	表 2 7 参照 ¹⁾	
燃焼継続時間 t [分]	11		
離隔距離 L_t [m]	190	表 2 9 参照	
形態係数 ϕ [-]	0.0300	式(6), (7)を用いて算出	
輻射強度 E_f [W/m ²]	7907	式(5)を用いて算出	
外表面温度 [°C]	112	T= 11 分後の値 (図 5 4 参照)	
内表面温度 [°C]	42 ²⁾		

1) 北側防火帯近傍で最大火線強度を観測した, ケース 3 発火時刻 7:00) の値。

2) 1F 実施計画 2.13 乾式キャスク仮保管設備 II-2-13 添 4-39 より内表面許容温度は 65°Cである。

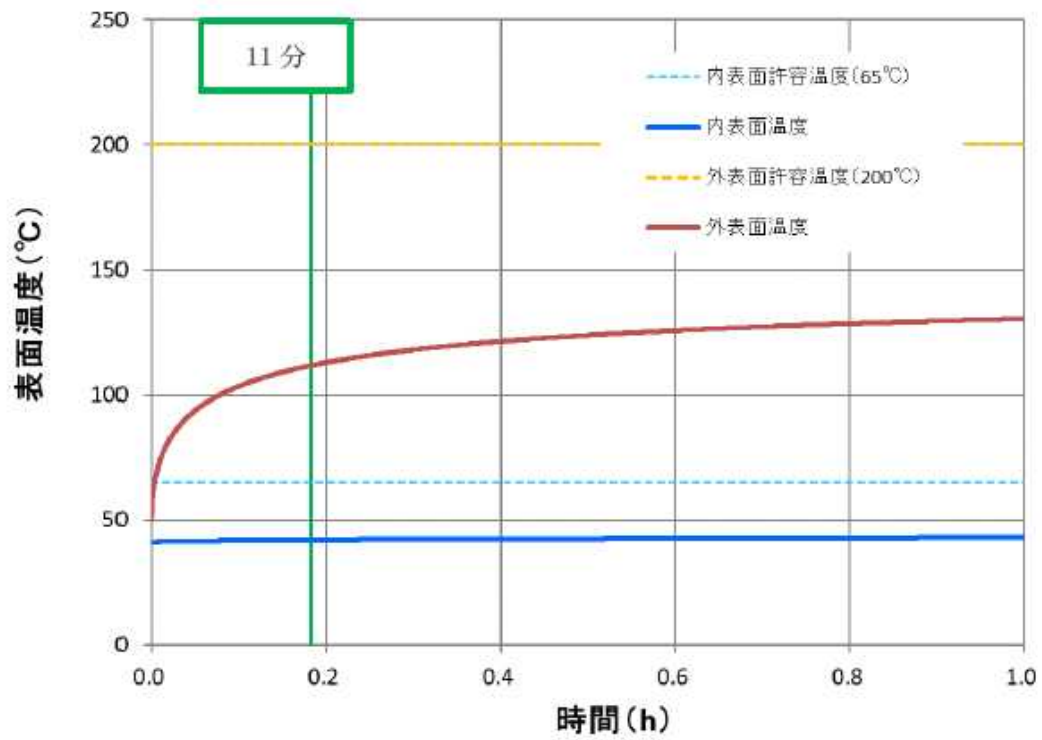


図 5.5 コンクリートモジュールの表面温度時間変化

図は最新の情報に合わせ評価中

2.2 近隣の産業施設の火災・爆発

近隣の産業施設の火災・爆発で評価する内容はガイドの附属書B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について（以下、「附属書B」という。）」に基づく。附属書Bでは発電所敷地外の産業施設を石油コンビナート等としているが、石油コンビナート以外にもガソリンスタンドのような危険物貯蔵施設、工場用ガスタンクのような高圧ガス貯蔵施設が存在することから、以下の通り評価を分けることとする。

- ・石油コンビナートの火災・ガス爆発影響評価
- ・危険物貯蔵施設の火災影響評価
- ・高圧ガス貯蔵施設の火災・ガス爆発影響評価

2.2.1 石油コンビナートの火災・ガス爆発影響評価

産業施設のうち、石油コンビナートは危険物の貯蔵量が特に多く、火災・ガス爆発が発生した場合の影響が大きいため個別に評価を実施する。

(1) 評価対象施設

評価対象は発電所敷地外の半径10km圏内に存在する、石油コンビナート等災害防止法で規制される特別防災区域内の特定事業所とする。

福島県内の特別防災区域は「広野地区」「いわき地区」の二か所であり、これらはそれぞれ福島第一原子力発電所から約21km及び約60kmの場所にあり、いずれも福島第一原子力発電所から10km以遠である（図56）。以上より、評価対象範囲内に石油コンビナート及び特定事業所は存在せず、キャスク仮保管設備に影響を及ぼすことはない。



注) 図の位置はおおよそその場所を表している

図56 福島県内の石油コンビナート等特別防災区域の位置と福島第一原子力発電所までの距離

2.2.2 危険物貯蔵施設の火災影響評価

福島第一原子力発電所から 10km 圏内における危険物貯蔵施設を抽出して火災影響を評価する。ここで、危険物貯蔵施設の抽出に先立ち評価に要するパラメータを仮設定し、10km 圏内にどのような危険物貯蔵施設がある場合にコンクリートモジュールに影響があるのかを評価する。

(1) 評価条件

具体的な評価指標を表 3 1 に示す。

表 3 1 評価指標及び評価の観点

評価指標	内容
輻射強度 [W/m^2]	火災の炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度
形態係数 [-]	火災と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径 [m]	防油堤規模より求めた燃焼半径
危険距離 [m]	延焼防止に必要な距離

上記の評価指標は、受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する（図 5 7 参照）。油の液面火災では、火炎面積の半径が 3m を超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うために、火災規模による輻射熱発散度の低減が無いものとする。

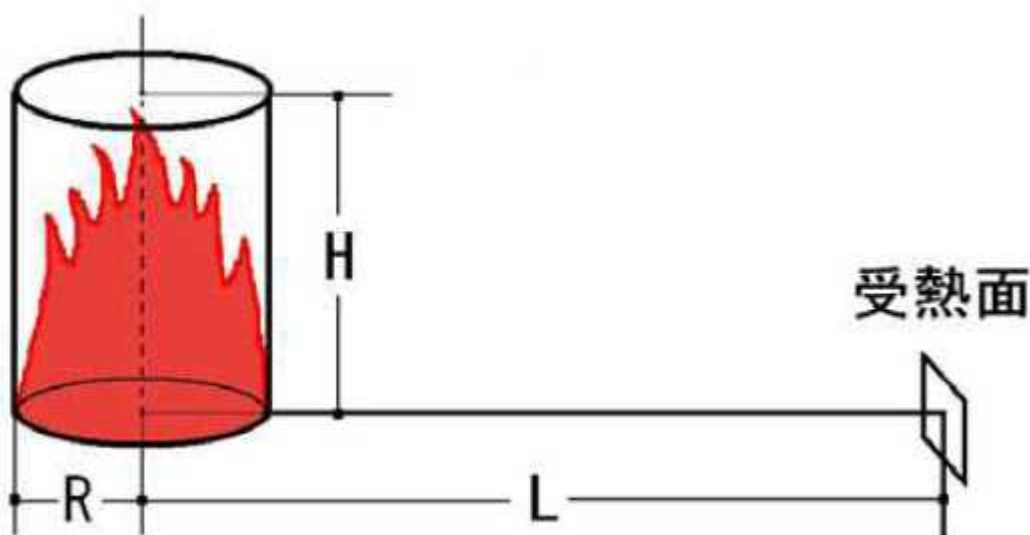


図 5 7 火災発生時の評価モデル仮定

評価に必要なデータを表 3 2 に示す。

表 3 2 評価に必要なデータ

データ種類	整備要領
輻射発散度[W/m ²]	燃焼する可燃物によって決まる定数
防油堤規模	防油堤の縦及び横の大きさ 火災が発生する面積であるため燃焼面積[m ²]と読み替える
危険輻射強度[W/m ²]	原子炉施設の外壁、天井スラブ等の輻射熱に対する耐熱性を輻射強度で示したもの

本評価では燃焼半径及び危険距離を複数設定し、燃焼半径に対する危険距離毎の輻射強度を算出し、コンクリートモジュールの危険輻射強度を下回る条件を評価する。燃焼半径を燃焼面積、危険距離を離隔距離に置き換え、表 3 3 の通り危険物、燃焼面積及び離隔距離を設定する。危険物の種類は外部火災影響評価ガイドに記載されているもののうち最も輻射発散度の大きい n-ヘキサンを設定する。コンクリートモジュールの危険輻射強度は 2.1.2.5 項で算出した値を用いる。

設定値は最新の情報に合わせ評価中

表 3 3 危険物火災の評価条件

危険物の種類	n-ヘキサン
輻射発散度[kW/m ²] ¹⁾	85
燃焼面積[m ²]	1,000・10,000・50,000・100,000
離隔距離[m]	100・200・300・400・500・600・700・800・900・1,000・1,500・2,000
危険輻射強度[W/m ²]	19760

1) 附属書 B より

(2) 燃焼半径の算出

燃焼半径は防油堤規模より算出する。防油堤面積に等しい円筒火災を生ずるものと想定し、燃焼半径 R[m] を算出する。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

$$S : \text{防油堤面積 (火炎円筒の底面積)} = [\text{m}^2]$$

R は設定する燃焼面積毎に異なる値となる。

(3) 輻射強度の算出

火災の火炎から任意の位置にある点 (受熱点) の輻射強度は、輻射発散度に形態係数を掛けた値になる。

$$E = Rf \times \phi$$

E : 危険輻射強度 [W/m²], Rf : 輻射発散度 [W/m²], φ : 形態係数

形態係数は以下の式で求められる。

$$\varphi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

$$m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1 + n)^2 + m^2, B = (1 - n)^2 + m^2$$

φ : 形態係数, L : 危険距離 [m], H : 火炎高さ [m], R : 燃焼半径 [m]

通常の評価では評価対象の危険輻射強度, 火災の輻射強度から形態係数を算出し, 上記の式を用いて危険距離を算出する。本評価では火災の輻射強度を固定し, 表 3 3 の燃焼面積と離隔距離を入力することで条件ごとの形態係数及び危険輻射強度を算出する。

(4) 危険距離評価結果

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

各燃焼面積において n - ヘキサゴンによる火災が発生した場合の, 離隔距離ごとの輻射強度は表 3 4, 表 3 5 の通り。

燃焼面積が 100,000 m² の場合, 400m の離隔距離があれば火災による輻射強度がキャスクの許容輻射入熱流束を下回る。同様に, 燃焼面積 50,000 m² の場合離隔距離 300m, 燃焼面積 10,000 m² の場合離隔距離 200m, 燃焼面積 1,000 m² の場合離隔距離 100m があれば火災による熱影響は無いといえる。福島第一原子力発電所敷地外の周囲 10km 圏内の危険物貯蔵施設の設置状況については, 現在調査中である。

10km 圏内の設備は現在調査中

(5) 熱影響評価結果

一定の輻射強度で昇温されるものと仮定して, 熱影響評価結果 (温度評価) を実施する。

2.1.2.5 項と同様に北側防火帯近傍の火炎輻射発散度を使用する。図 5 2 に示した建屋温度評価体系を用いて, 下式(1)の 1 次元の非定常熱伝導方程式により温度評価を行う。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \dots (1)$$

敷地外火災においては燃焼継続時間を改めて設定する必要があるため, 敷地外の危険物貯蔵施設の設置状況調査完了後に評価を行う。コンクリートモジュール内部のキャスク本体に対する熱影響についても同様。

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 3 4 輻射強度 (W/m²) 対比表

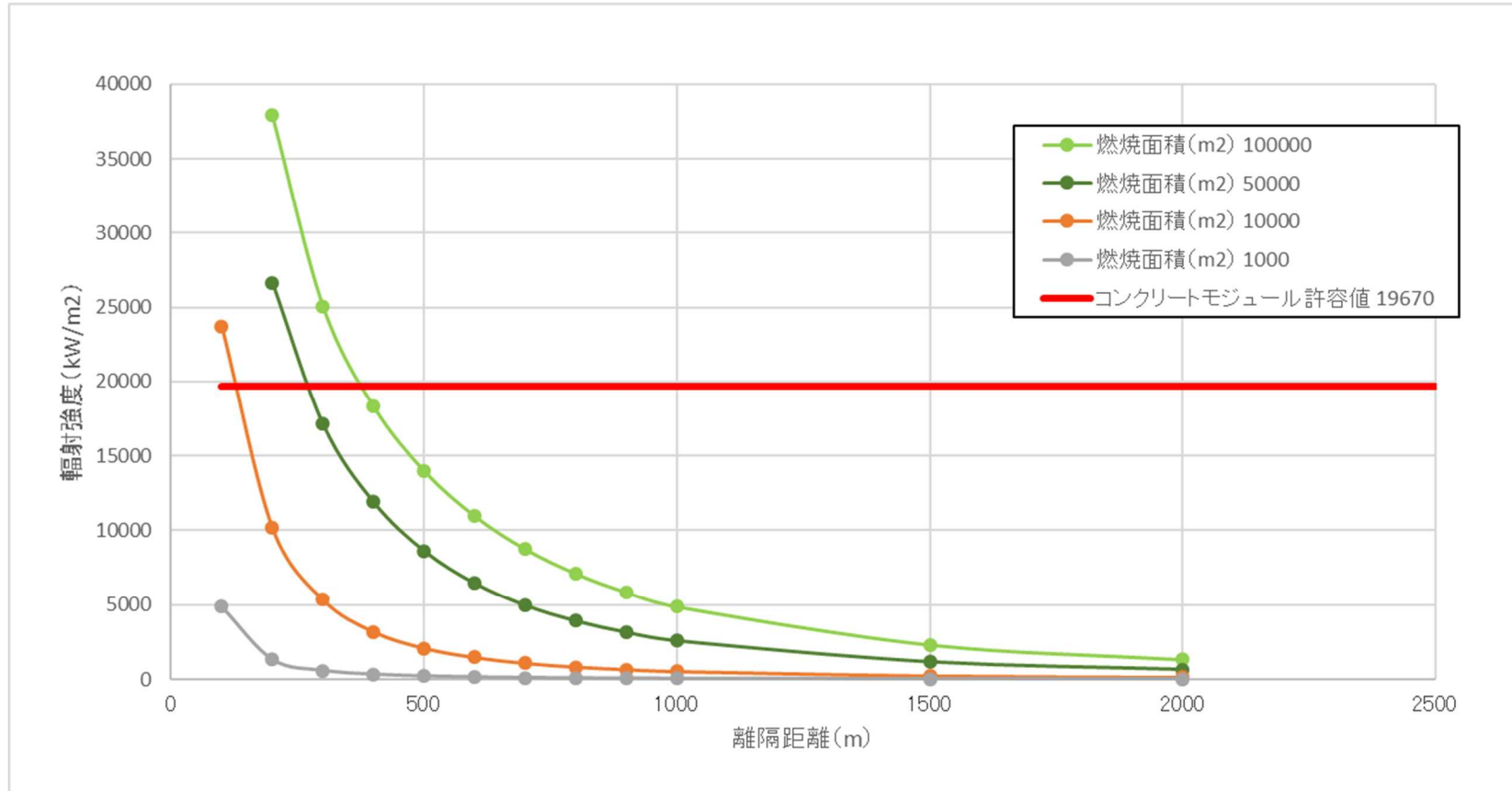
燃焼面積 (m ²)	離隔距離 (m)											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	2000
100,000	- ¹⁾	37909.08	25081.63	18322.65²⁾	13996.06	10967.01	8755.38	7102.27	5845.28	4874.98	2309.40	1319.87
50,000	- ¹⁾	26668.69	17111.37²⁾	11896.76	8621.78	6450.52	4961.92	3911.32	3149.65	2583.64	1175.06	662.81
10,000	23726.56	10174.88²⁾	5342.43	3186.27	2087.2	1463.9	1080.08	828.25	654.62	530.06	234.62	131.48
1,000	4874.98²⁾	1319.87	589.10	330.61	211.02	146.19	107.20	81.94	64.66	52.31	23.17	13.01

1) 燃焼半径が 100m を超えるため算出不可である。

2) 各燃焼面積に対し、輻射強度がコンクリートモジュールの許容輻射入熱流束を下回り、かつ離隔距離が最も小さい値である。

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 3 5 輻射強度対比グラフ



2.2.3 高圧ガス貯蔵施設の火災・ガス爆発影響評価

福島第一原子力発電所から 10km 圏内における高圧ガス貯蔵施設を抽出して火災・ガス爆発影響を評価する。2.2.2 項と同様に、高圧ガス貯蔵施設の抽出に先立ち評価に要するパラメータを仮設定し、10km 圏内にどのような高圧ガス貯蔵施設がある場合にコンクリートモジュールに影響があるのかを評価する。

(1) 評価条件

火災影響評価における具体的な評価指標及び評価に必要なデータは 2.2.2 項と同様である。ガス爆発影響評価における具体的な評価指標を表 3 6 に、評価に必要なデータを表 3 7 に示す。

表 3 6 評価指標及び評価の観点

評価指標	内容
危険限界距離[m]	ガス爆発の爆風圧が 0.01MPa 以下になる距離 (人体に対して影響を与えない爆風圧)

表 3 7 評価指標及び評価の観点

評価指標	内容
石油類のK値	コンビナート等保安規定第 5 条別表第二に掲げる数値 危険物毎に設定される定数である
貯蔵設備又は 処理設備のW値	コンビナート等保安規定第 5 条貯蔵設備又は処理設備の区分に応じて次に掲げる数値 貯蔵設備：液化ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位トン）の数値の平方根の数値（貯蔵能力が一トン未満のものにあつては、貯蔵能力（単位 トン）の数値）、圧縮ガスの貯蔵設備にあつては貯蔵能力（単位 立方メートル）を当該ガスの常用の温度及び圧力におけるガスの質量（単位トン）に換算して得られた数値の平方根の数値（換算して得られた数値が一未満のものにあつては、当該換算して得られた数値） 処理設備：処理設備内にあるガスの質量（単位 トン）の数値

(2) 火災熱影響評価

2.2.2 項と同様、燃焼半径及び危険距離を複数設定し、燃焼半径に対する危険距離毎の輻射強度を算出し、コンクリートモジュールの危険輻射強度を下回る条件を評価する。表 38 の通りガス、燃焼面積及び離隔距離を設定する。ガスの種類は外部火災影響評価ガイドに記載されているもののうち最も輻射発散度の高いエチレンを設定する。コンクリートモジュールの危険輻射強度は 2.1.2.5 項で算出した値を用いる。

表 38 ガス火災の評価条件

設定値は最新の情報に合わせ評価中

ガスの種類	エチレン
輻射発散度[kW/m ²] ¹⁾	134
燃焼面積[m ²]	1,000・10,000・50,000・100,000
離隔距離[m]	100・200・300・400・500・600・700・800・900・1,000・1,500・2,000
危険輻射強度[W/m ²]	19760

1) 附属書Bより

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

燃焼半径、輻射強度の算出については 2.2.2 項と同様である。

各燃焼面積においてエチレンによる火災が発生した場合の、離隔距離ごとの輻射強度は表 39、表 40 の通り。

燃焼面積が 100,000m² の場合、2,000m の離隔距離があれば火災による輻射強度がキャスクの許容輻射入熱流束を下回る。同様に、燃焼面積 50,000m² の場合離隔距離 300m、燃焼面積 10,000m² の場合離隔距離 200m、燃焼面積 1,000m² の場合離隔距離 100m があれば火災による熱影響は無いといえる。福島第一原子力発電所敷地外の周囲 10km 圏内の危険物貯蔵施設の設置状況については、現在調査中である。

10km 圏内の設備は現在調査中

(3) 熱影響評価結果

2.2.2 項と同様に熱影響評価結果（温度評価）を実施する。算出方法も同様で、燃焼継続時間を改めて設定する必要があるため、敷地外の高圧ガス貯蔵施設の設置状況調査完了後に評価を行う。コンクリートモジュール内部のキャスク本体に対する熱影響についても同様。

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 3 9 輻射強度対比表

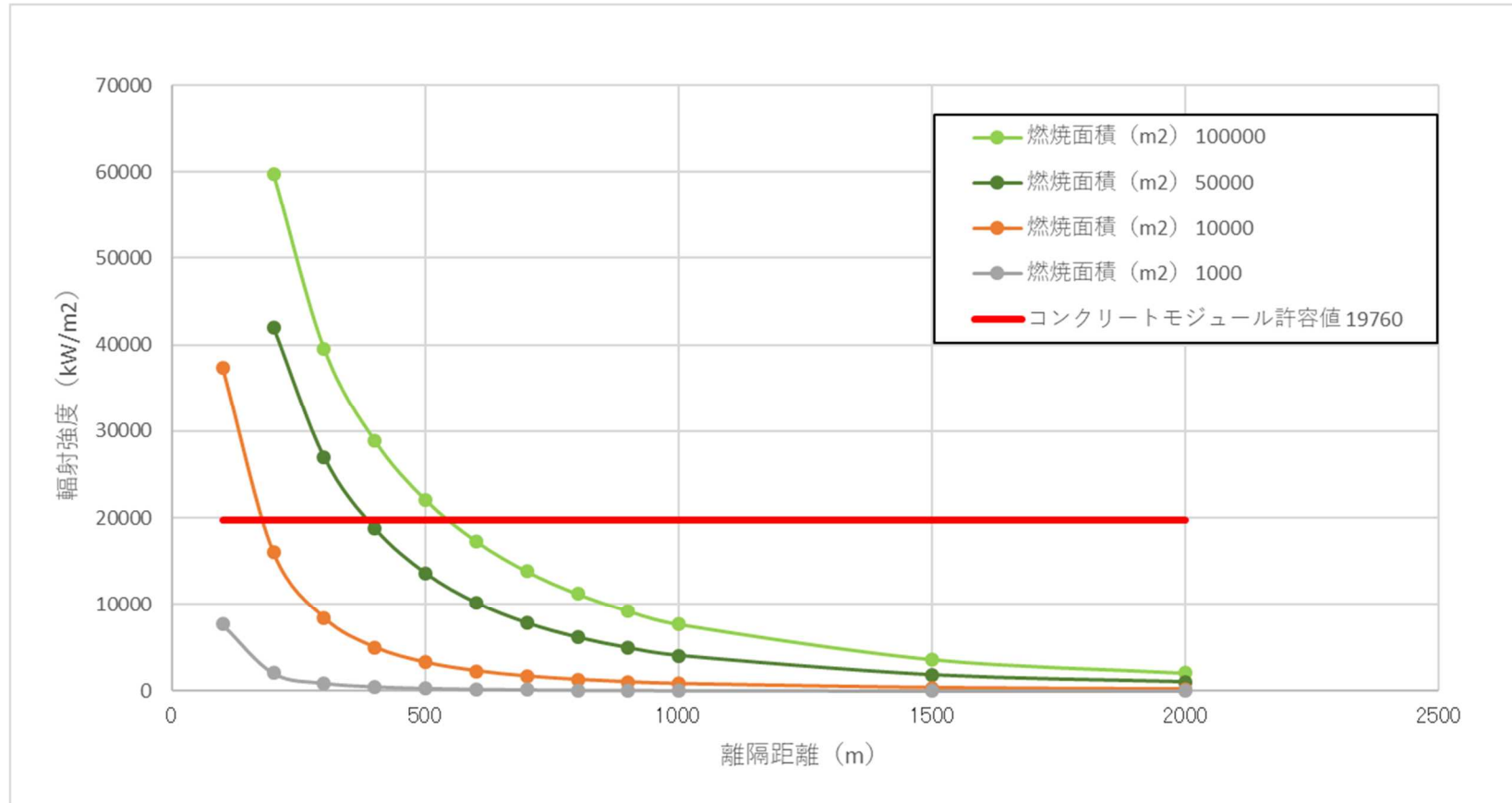
燃焼面積 (m ²)	離隔距離 (m)											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	2000
100,000	— ¹⁾	59762.55	39540.45	28885.11	22064.37	17289.17²⁾	13802.60	11196.51	9214.90	7685.25	3640.69	2080.74
50,000	— ¹⁾	42042.4	26975.56	18754.89²⁾	13591.97	10169.05	7822.32	6166.08	4965.33	4073.04	1852.44	1044.90
10,000	37404.22	16040.40²⁾	8422.18	5023.05	3290.41	2307.79	1702.71	1305.71	1031.99	835.63	369.87	207.28
1,000	7685.25²⁾	2080.74	928.69	521.20	332.66	230.47	168.99	129.17	101.93	82.47	36.52	20.50

1) 燃焼半径が 100m を超えるため算出不可である。

2) 各燃焼面積に対し、輻射強度がコンクリートモジュールの許容輻射入熱流束を下回り、かつ離隔距離が最も小さい値である。

表 4 0 輻射強度対比グラフ

評価値は最新の情報に合わせ評価中



□内の値は最新の情報に合わせ評価中

(3) ガス爆発影響評価

ガス爆発が発生した場合の危険限界距離を求め、キャスク仮保管設備から高圧ガス貯蔵施設への離隔距離が危険限界距離以上であることを確認する。本評価においては、福島第一原子力発電所から約 11 kmの地点に規模の大きい高圧ガス貯蔵施設があることが調査により判明しているため、この施設を参考に評価を行う。

表 4 1 の通り評価条件を設定する。火災と同様にエチレンが貯蔵されていると仮定する。貯蔵量は上記の高圧ガス貯蔵施設を参考に **33** とする。

表 4 1 高圧ガス爆発の評価条件

設定値は最新の情報に合わせ評価中

ガスの種類	エチレン
K 値 ¹⁾	1, 130, 000
貯蔵量[t]	33
W 値 ²⁾	5. 745

1) 附属書 B より

2) 貯蔵設備におけるガス貯蔵能力の数値の平方根の数値

危険限界距離は以下の式より算出する。

$$X = 0.04\lambda \cdot \sqrt[3]{K \times W}$$

X : 危険限界距離[m], λ : 換算距離 14. 4[m \cdot kg^{-1/3}], K : 石油類の定数, W : 設備定数

$$X = \mathbf{107.45}$$

表 4 1 の条件において、危険限界距離は 107. 45m となる。エチレン貯蔵量 33t 規模のガス貯蔵設備のガス爆発の場合で 200m の離隔距離があれば、爆風圧はコンクリートモジュールに影響を与えない。福島第一原子力発電所敷地外の周囲 10km 圏内の高圧ガス貯蔵施設の設置状況については、現在調査中である。

10km 圏内の設備は現在調査中

2.3 航空機墜落による火災

航空機墜落に伴う火災で評価する内容は、ガイドの付属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に基づき、評価を実施する。

2.3.1 航空機墜落の火災影響評価

航空機落下確率評価では、評価手法及び対象航空機の大きさの違いを考慮して落下確率を求めている。火災の影響は対象航空機の燃料積載量に大きく依存することから、別紙1に示すとおり、大型航空機と小型航空機に分類し、また、民間航空機と自衛隊航空機又は米軍航空機（以下、軍用航空機とする）に分類し以下のカテゴリごとに火災影響評価を実施する。

表4-2 航空機の分類

落下事故カテゴリ		分類
(1) 計器飛行方式民間航空機	1) 飛行場での離着陸時	— 注1
	2) 航空路を巡航中	(1) 大型民間航空機
(2) 有視界飛行方式民間航空機		
(3) 自衛隊機又は米軍機	1) 訓練空域外を飛行中	(3) 大型軍用航空機
	2) 基地—訓練空域間往復時	(4) 小型軍用航空機
		— 注2

注1：福島第一原子力発電所は、福島空港からの最大離着陸地点以遠に位置するため対象外（別紙2）

注2：福島第一原子力発電所は、基地—訓練空域間の往復の想定範囲内に入らないため対象外

(1) 航空機墜落の火災の想定

- ・航空機は、福島第一原子力発電所における航空機落下評価の対象航空機のうち燃料積載量が最大の機種とする。
- ・航空機は燃料を満載した状態を想定する。
- ・航空機の落下は発電所敷地内であって落下確率が 10^{-7} [回/炉・年] 以上になる範囲のうちキャスク仮保管設備への影響が最も厳しくなる地点で起こることを想定する。
- ・航空機の落下によって燃料に着火し火災が起こることを想定する。
- ・気象条件は無風状態とする。
- ・火災は円筒火炎をモデルとし、火炎の高さは燃焼半径の3倍とする。

表 4 3 燃料積載量が最大の機種

分類	航空機	選定理由
大型民間航空機 (固定翼, 回転翼)	A380	民間の大型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
小型民間航空機 (固定翼, 回転翼)	Do228-200	民間の小型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
大型軍用航空機 (固定翼, 回転翼)	KC-767 (空中給油機)	主要自衛隊航空機(別紙3)の大型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定
小型軍用航空機 (固定翼, 回転翼)	UH-2	主要自衛隊航空機(別紙3)の小型航空機の中で燃料積載量が最大規模のものを選定

(2) 評価手法の概要

本評価は、福島第一原子力発電所に対する航空機墜落の火災影響の有無の評価を目的としている。具体的な評価指標とその内容を以下に示す。

表 4 4 評価指標及びその内容

評価指標	内容
輻射強度[W/m ²]	火災の炎から任意の位置にある点(受熱点)の輻射強度
形態係数[-]	火炎と受熱面との相対位置関係によって定まる係数
燃焼半径[m]	航空機燃料タンクの投影面積より求めた燃焼半径
燃焼継続時間[s]	火災が終了するまでの時間
離隔距離[m]	キャスク仮保管設備を中心にして落下確率が10 ⁻⁷ [回/炉・年]以上になる地点とその地点からキャスク仮保管設備までの直線距離
許容温度[°C]	想定火災に対しキャスク仮保管設備外壁が熱影響のない温度

上記の評価指標は、受熱面が輻射帯の底部と同一平面上にあると仮定して評価する。油の液面火災では、火炎面積の半径が3mを超えると空気供給不足により大量の黒煙が発生し輻射発散度が低減するが、本評価では保守的な判断を行うために、火災規模による輻射発散度の低減がないものとする。

航空機落下による火災の輻射熱に対するキャスク仮保管設備外壁の表面温度が許容温度を超えないこと及びキャスク本体への熱影響がないことを評価する。

(3) 評価対象範囲

評価対象範囲は、発電所敷地内であって落下確率が10⁻⁷[回/炉・年]以上になる範囲のうちキャスク仮保管設備への影響が最も厳しくなる区域とすることから、福島第一原子力発電所における航空機落下確率評価の対象航空機を、大型民間航空機、小型

民間航空機，大型軍用航空機，小型軍用航空機に分類し，それぞれの機種の落下確率の合計が 10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積を算出し，その結果からキャスク仮保管設備からの離隔距離を以下のとおり算出する。

(4) 標的面積の算出

a. 大型民間航空機及び小型民間航空機の標的面積の算出

(a) 計器飛行方式民間航空機の航空路を巡航中の落下事故

$$P_c = f_c \cdot N_c \cdot A / W$$

P_c : 対象施設への巡航中の航空機落下確率[回/年]

N_c : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数[飛行回/年]

A : キャスク仮保管設備の標的面積[km²]

W : 航空路幅[km]

$f_c = G_c / H_c$: 単位飛行距離当たりの巡航中の落下事故率[回/飛行回・km]

G_c : 巡航中事故件数[回]

H_c : 延べ飛行距離[飛行回・km]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 4 5 標的面積の算出結果

設備名称 パラメータ	福島第一原子力発電所 キャスク仮保管設備		
	広域航法経路 (Y30)	直行経路 MIYAKO (MQE) - IWAKI (IXE)	直行経路 SENDAI (SDE) - IWAKI (IXE)
対象航空路 ^{注1}			
N_c ^{注2}	9490	182.5	365
A ^{注3}	0.01	0.01	0.01
W ^{注4}	18.52	14.816	14.816
f_c ^{注5}	0.5/11,759,413,566 = 4.25×10^{-11}		
P_c	2.18×10^{-10}	5.24×10^{-12}	1.05×10^{-11}
P_c (合計)	2.34×10^{-10}		

注1 : 福島第一原子力発電所周辺の航空図 (AIPエンルートチャート) による。(別紙4)

注2 : 国土交通省航空局への問合せ結果 (ピークデイの値) を365倍した値。ただし，令和4年のピークデイにおける飛行回数が0回の場合は，保守的に0.5回とみなし，年間182.5回とする。(別紙5)

注3 : キャスク仮保管設備の水平面積の合計値は0.01 km²以下であるので標的面積は0.01 km²とする。(別紙6)

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

注4：「飛行方式設定基準」による。

注5：巡航中事故件数は、平成13年～令和2年の間で0件のため、保守的に0.5件とする。延べ飛行距離は、平成13年～令和2年の「航空輸送統計年報，第1表 総括表，1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内の値を合計した値。（別紙7）

(b) 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

$$P_v = (f_v/S_v) \cdot A \cdot \alpha$$

P_v ：対象施設への航空機落下確率[回/年]

f_v ：単位年当たりの落下事故率[回/年]

S_v ：全国土面積[km²]

A ：キャスク仮保管設備の標的面積[km²]

α ：対象航空機の種類による係数

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表46 落下確率の算出結果

パラメータ	大型固定翼機	大型回転翼機	小型固定翼機	小型回転翼機
f_v 注	0.5/20=0.025 注2	1/20=0.05	22/20=1.1	17/20=0.85
S_v 注	372,000			
α 注	1.0	1.0	0.1	0.1
A	0.01	0.01	0.01	0.01
P_v	6.72×10^{-10}	1.34×10^{-9}	2.86×10^{-9}	2.28×10^{-9}
P_v (合計)	7.26×10^{-9}			

注：「NTEN-2023-2001 NRA技術ノート 航空機落下事故に関するデータ（平成13～令和2年）」（令和5年3月 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ）による。

以上より、

大型民間航空機の落下確率（ P_c （計器飛行方式）+ P_v （大型固定翼機）+ P_v （大型回転翼機））が 10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積 A_1 [km²]を計算すると以下のとおりとなる。

$$A_1 = 10^{-7} \div (2.34 \times 10^{-10} + 6.72 \times 10^{-10} + 1.34 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.445 [\text{km}^2]$$

小型民間航空機の落下確率（ P_v （小型固定翼機）+ P_v （小型回転翼機））が 10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積 A_2 [km²]を計算すると以下のとおりとなる。

$$A_2 = 10^{-7} \div (2.86 \times 10^{-9} + 2.28 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.191 [\text{km}^2]$$

b. 大型軍用航空機及び小型軍用航空機の標的面積の算出

福島第一原子力発電所の上空には訓練空域がないため、軍用航空機の落下確率 P_{so} を求める式は、以下のとおりとなる。

$$P_{so} = (f_{so}/S_o) \cdot A$$

P_{so} : 訓練空域外での対象施設への航空機落下確率[回/年]

f_{so} : 単位年当たりの訓練空域外落下事故率[回/年]

S_o : 全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積[km²]

A : キャスク仮保管設備の標的面積[km²]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 4 7 落下確率の算出結果

パラメータ	大型自衛隊機	大型米軍機	小型自衛隊機	小型米軍機
f_{so} 注	4/20=0.2	3/20=0.15	11/20=0.55	1/20=0.05
S_o 注	294,000	371,500	294,000	371,500
A	0.01	0.01	0.01	0.01
P_{so}	6.80×10^{-9}	4.03×10^{-9}	1.87×10^{-8}	1.34×10^{-9}
P_{so} (合計)	3.09×10^{-8}			

注：「NTEN-2023-2001 NRA技術ノート 航空機落下事故に関するデータ（平成13～令和2年）」（令和5年3月 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ）による。

以上より、

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

大型軍用航空機の落下確率 (P_{so} (大型自衛隊機) + P_{so} (大型米軍機)) が 10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積 A_3 [km²] を計算すると以下のとおりとなる。

$$A_3 = 10^{-7} \div (6.80 \times 10^{-9} + 4.03 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.092 \text{ [km}^2\text{]}$$

小型軍用航空機の落下確率 (P_{so} (小型自衛隊機) + P_{so} (小型米軍機)) が 10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積 A_4 [km²] を計算すると以下のとおりとなる。

$$A_4 = 10^{-7} \div (1.87 \times 10^{-8} + 1.34 \times 10^{-9}) \times 0.01 = 0.050 \text{ [km}^2\text{]}$$

(5) キャスク仮保管設備からの離隔距離の算出

(4)で求めた面積が、評価対象となるキャスク仮保管設備コンクリートモジュール外壁面から等距離の離隔をとった場合の標的面積と等しくなる距離を離隔距離 L [m]とし、離隔距離 L を算出した結果を以下に示す。また、各航空機の離隔距離を図58に示す。

評価値及び口内の値は最新の情報に合わせ評価中

表 4 8 キヤスク仮保管設備からの離隔距離の算出結果

項目		大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
対象航空機		A380	Do228-200	KC-767	UH-2
キヤスク仮保 管設備	コンクリートモ ジュール 外壁面までの 離隔距離[m]	322	193	119	74

※：航空機墜落による危険物貯蔵施設の重畳火災も考慮し、キヤスク仮保管設備から最も近い屋外危険物取扱設備の離隔距離(181m)位置に危険物屋外貯蔵所があると仮定し、重畳評価を実施する。

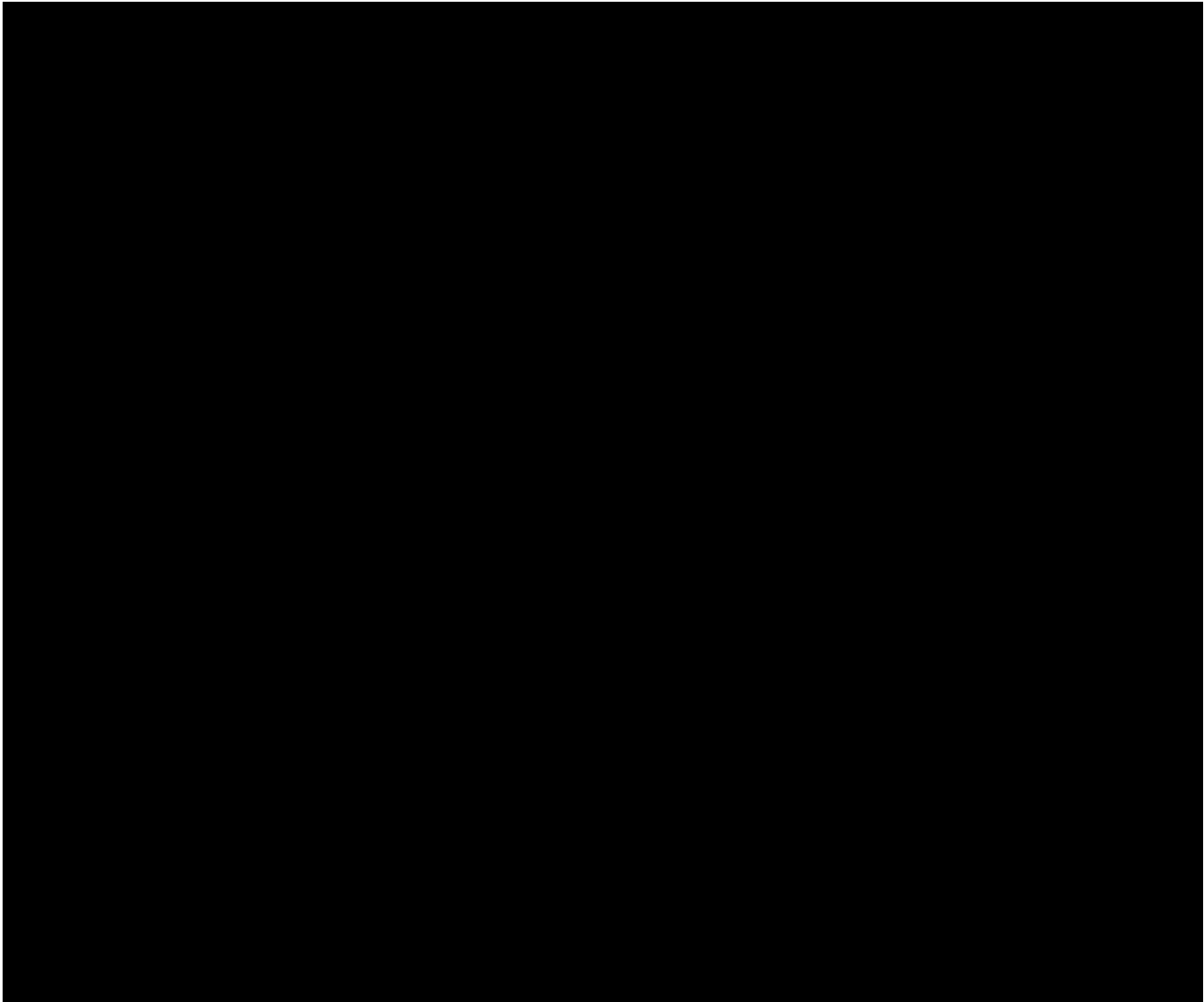
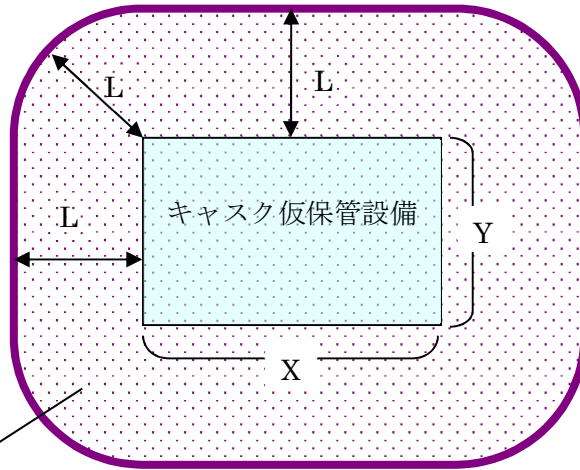


図 5 8 各航空機の墜落位置

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積の考え方は、以下のとおり。



10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積=S

図59 標的面積の考え方

キャスク仮保管設備外壁面から等距離の離隔をとり、 10^{-7} [回/炉・年]となる標的
面積をSとした場合、以下の式が成り立つ。

$$S = XY + 2LX + 2LY + \pi L^2 / 4 \times 4$$

$$\pi L^2 + 2(X+Y)L + XY - S = 0$$

二次方程式の解の公式より、以下の式となる。

$$L = \frac{-(X+Y) + \sqrt{(X+Y)^2 - \pi(XY - S)}}{\pi}$$

(6) 必要データ

評価に必要なデータを以下に示す。下表に示すとおり，小型民間航空機は大型軍用航空機と比べ輻射発散度が小さく，燃料タンク面積も小さく，離隔距離も離れていることから大型軍用航空機の評価に包絡される。

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 4 9 航空機火災影響評価に必要なデータ

項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
想定する航空機	A380	Do228-200	KC-767	UH-2
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
燃料量[m ³]	320	2.39	145.03	1.87
輻射発散度[kW/m ²]	50	50	58	58
燃焼速度[m/s]	6.666×10 ⁻⁵	6.666×10 ⁻⁵	6.710×10 ⁻⁵	6.710×10 ⁻⁵
燃料タンク面積[m ²]	871	27	295	17
キャスク仮保管設備外壁 面までの離隔距離[m]	322	193	119	74

※出典については，参考資料1参照

(7) 燃焼半径の算出

航空機墜落による火災においては墜落の状況によって，様々な燃焼範囲の形態が想定されるが，円筒火炎モデルとして評価を実施するため，燃焼半径は対象とした航空機燃料タンクの投影面積を円筒の底面と仮定して以下のとおり算出する。

$$R = (S / \pi)^{0.5}$$

R：燃焼半径[m]，S：燃料タンク投影面積（火炎円筒の底面積）

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 0 燃焼半径の算出結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
想定する航空機	A380	KC-767	UH-2
燃料タンク面積[m ²]	871	295	17
燃焼半径[m]	16.7	9.69	2.33

(8) 形態係数の算出

次の式から形態係数を算出する。

$$\phi = \frac{1}{\pi m} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、

$$m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$$

ϕ : 形態係数, L : 離隔距離[m], H : 火炎高さ[m], R : 燃焼半径[m]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 1 形態係数の算出結果

項目		大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
燃焼半径[m]		16.7	9.69	2.33
キャスク仮 保管設備外 壁面	離隔距離[m]	322	119	74
	形態係数	0.005235	0.012968	0.001924

(9) 輻射強度の算出

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数をかけた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E : 輻射強度, R_f : 輻射発散度, ϕ : 形態係数

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 2 輻射強度の算出結果

項目		大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射発散度[kW/m ²]		50	58	58
兼用キャス ク外壁面	形態係数	0.005235	0.012968	0.001924
	輻射強度[W/m ²]	261.78	752.15	111.57

(10) 燃焼継続時間の算出

燃焼継続時間は、燃料量を燃焼面積と燃焼速度で割った値になる。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v}, \quad v = \frac{M}{\rho} \quad \text{より,} \quad t = \frac{V \times \rho}{\pi R^2 \times M}$$

t : 燃焼継続時間[s], V : 燃料積載量[m³], R : 燃焼半径[m], v : 燃焼速度[m/s]

M : 質量低下速度 [kg/m²・s], ρ : 密度 [kg/m³]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 3 燃焼継続時間の算出結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
燃料量 [m ³]	323	145.03	1.87
燃料面積 πR ² [m ²]	871	295	17
質量低下速度 [kg/m ² ・s]	0.054	0.051	0.051
燃料密度 [kg/m ³]	810	760	760
燃焼速度 [m/s]	6.666 × 10 ⁻⁵	6.710 × 10 ⁻⁵	6.710 × 10 ⁻⁵
燃焼継続時間 [hour]	1.53	2.04	0.46

※出典については、参考資料-2 参照

(11) 評価結果

a. キャスク仮保管設備外壁の耐火性能評価

(a) 許容温度

本評価で用いる許容温度については、一般的にコンクリートの強度に影響がないとされる200℃※とする。

※原田和典, 建築火災のメカニズムと火災安全設計, 財団法人 日本建築センター

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度でキャスク仮保管設備外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容温度以下であるか評価を実施する。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left(\frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18 h \sqrt{t}} + 1 \right) \frac{h}{\varepsilon E}}$$

出典：原田和典, 建築火災のメカニズムと火災安全設計, 日本建築センター

T₀: 初期温度 [50℃], E: 輻射強度 [W/m²], ε: コンクリート表面の放射率 (0.95), h: コンクリート表面熱伝達率 [34.9W/m²K], k: コンクリート熱伝導率 [1.6W/mK], ρ: コンクリート密度 [2200kg/m³], c: コンクリート比熱 [879J/kgK], t: 燃焼継続時間 [s]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 4 キャスク仮保管設備外壁面の温度評価結果

項目	大型民間航空機	大型軍用航空機	小型軍用航空機
輻射強度[W/m ²]	261.78	752.15	111.57
燃焼継続時間[hour]	1.53	2.04	0.46
表面温度[°C]	55	64	52

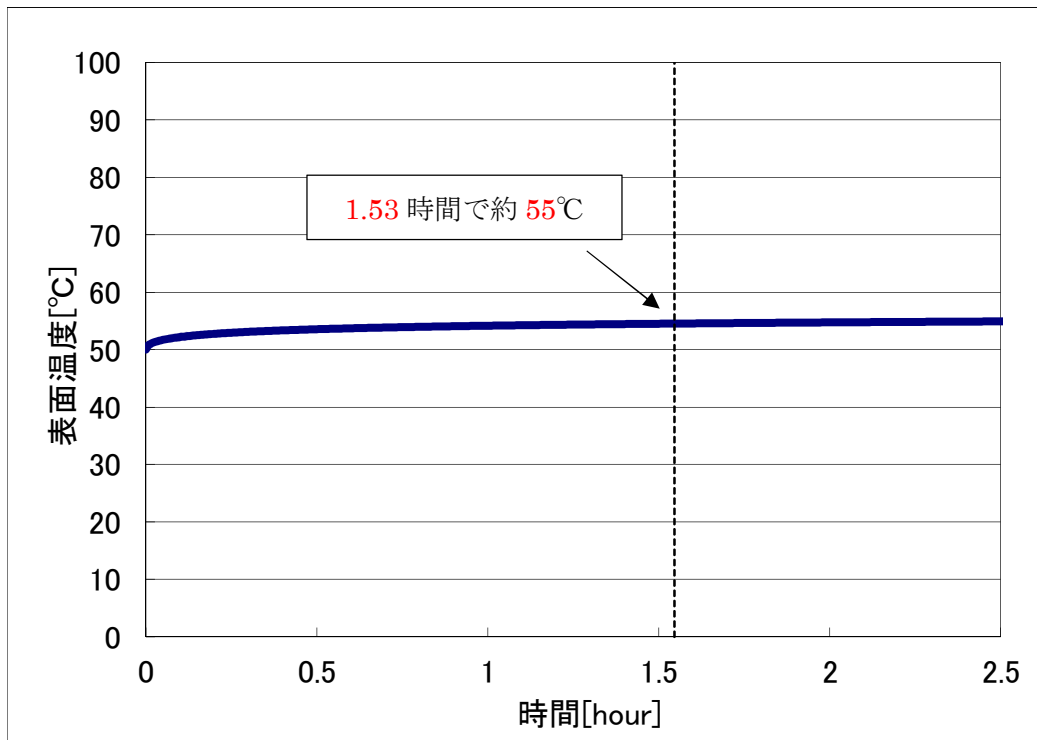


図 6 0 外壁面温度推移 (大型民間航空機)

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

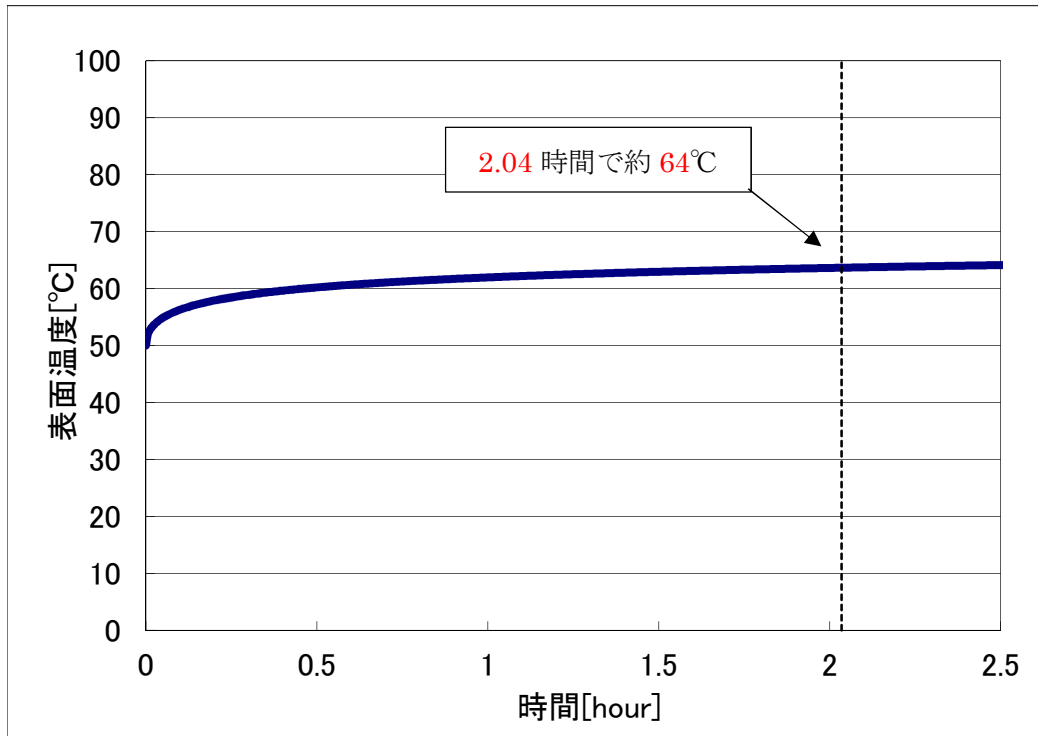


図 6 1 外壁面温度推移 (大型軍用航空機)

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

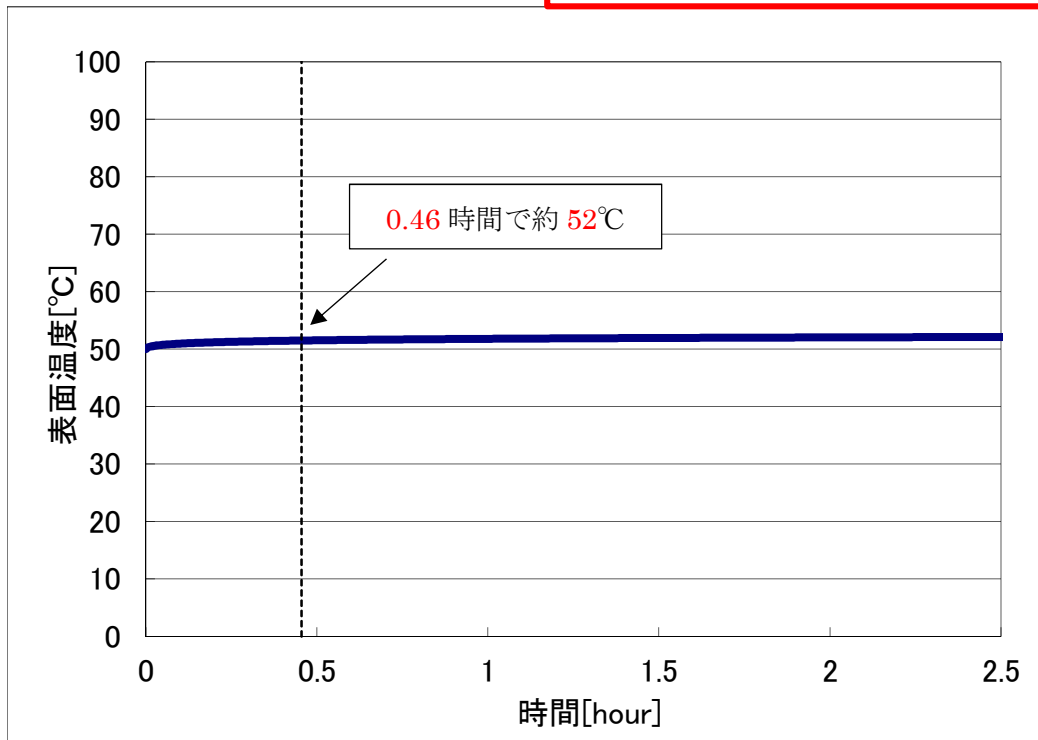


図 6 2 外壁面温度推移 (小型軍用航空機)

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

(12) 航空機墜落火災と危険物貯蔵設備の重畳

a. 重畳する危険物貯蔵設備の選定

航空機火災が発生した場合に重畳を考慮する危険物貯蔵設備を検討する。航空機落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]となる航空機墜落位置とその周辺の危険物施設位置を図6-3に示す。廃止措置作業に伴う敷地内のレイアウト変更も加味し、キャスク仮保管設備から最も近いNo.1危険物屋外貯蔵所B (181m)に、福島第一発電所構内で現実的に大容量保管され、かつ、放射発散度が大きいガソリンが、最も危険物を内包する設備 (No.2危険物屋外貯蔵所)、かつ、最も広い床面積 (No.1～No.10気絶縁油タンクの堰の総面積) で設置されたとして、評価を実施する。

キャスク仮保管設備から181m範囲で航空機落下が想定される機種は小型軍用航空機、大型軍用航空機であり、キャスク仮保管設備への熱影響は大型軍用航空機の方が大きい。よって大型軍用航空機(KC-767)が落下した際に、ガソリン火災が重畳すると仮定し熱影響評価を実施する。なお、航空機落下位置は、航空機落下火災による影響が最も厳しくなるよう落下確率が 10^{-7} [回/炉・年]となる位置とする。

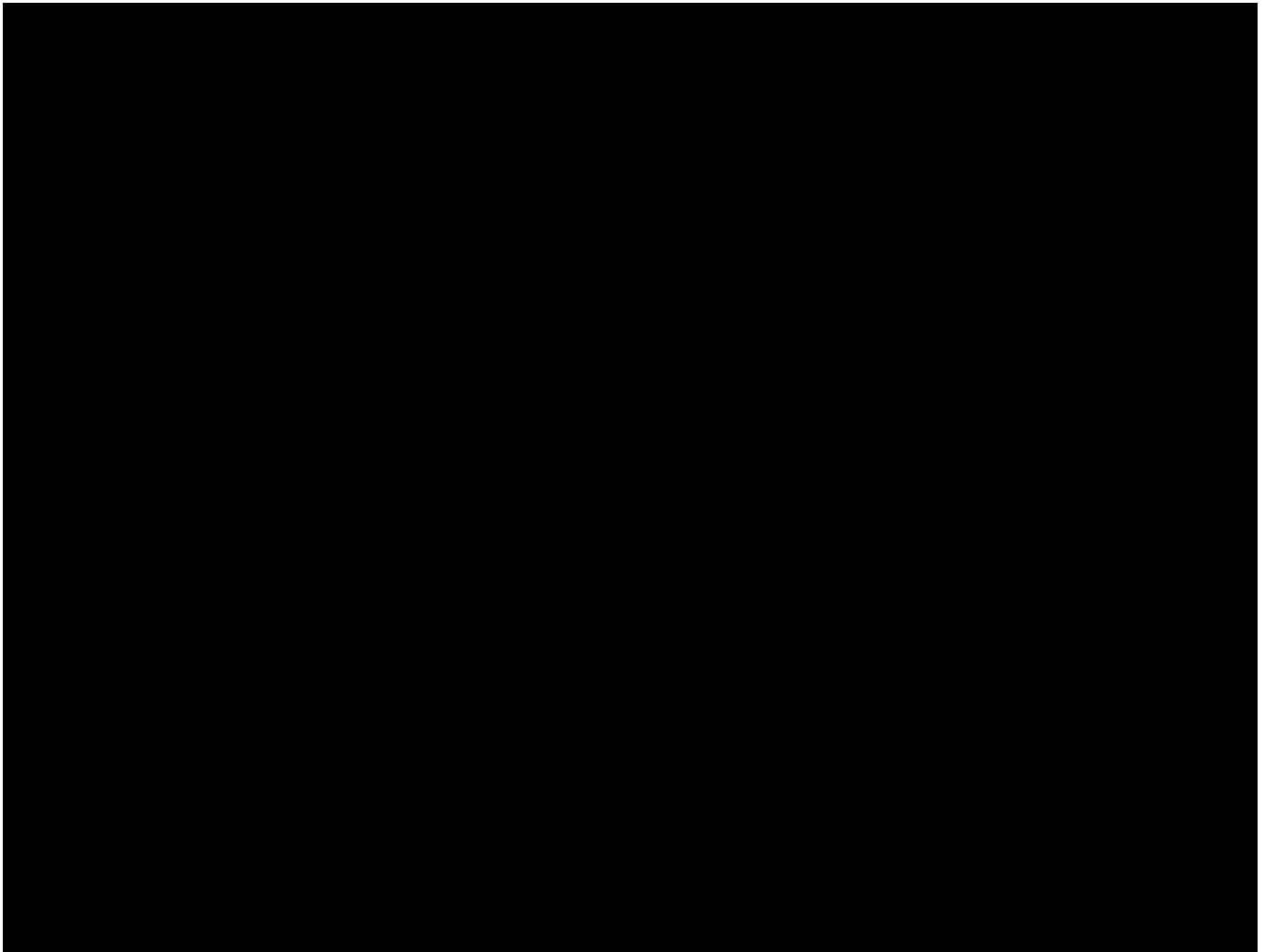


図6-3 航空機墜落位置と危険物タンクの重畳を考慮する位置

b. キャスク仮保管設備に対する影響評価（ガソリタンクとの重畳）

(a) キャスク仮保管設備の受熱量評価

評価に必要なデータは以下のとおり

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 5 ガソリタンク火災影響評価に必要なデータ

項目	ガソリタンク	大型軍用航空機 (KC-767)
燃料の種類	ガソリン	JP-4
燃料量[m ³]	1488	145.03
輻射発散度[kW/m ²]	58	58
燃焼速度[m/s]	6.711×10 ⁻⁵	6.711×10 ⁻⁵
燃焼面積[m ²]	676	295
燃焼半径[m]	14.67	9.69
キャスク仮保管設備までの距離[m]	181	119
燃焼継続時間[hour]	9.11	2.04

次の式から形態係数を算出する。

$$\phi = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right] \right\}$$

ただし、 $m = \frac{H}{R} \cong 3, n = \frac{L}{R}, A = (1+n)^2 + m^2, B = (1-n)^2 + m^2$

φ：形態係数，L：離隔距離[m]，H：火炎高さ[m]，R：燃焼半径[m]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 6 形態係数の算出結果

項目	ガソリタンク	大型軍用航空機 (KC767)
キャスク仮保管設備までの距離[m]	181	119
燃焼半径 R[m]	14.67	9.69
形態係数	0.019346	0.012968

火災の火炎から任意の位置にある点（受熱点）の輻射強度は、輻射発散度に形態係数をかけた値となる。次式から輻射強度を算出する。

$$E = R_f \times \phi$$

E：輻射強度，R_f：輻射発散度，φ：形態係数

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 7 輻射強度の算出結果

項目	ガソリントank	大型軍用航空機 (KC-767)
輻射発散度[kW/m ²]	58	58
形態係数	0.019346	0.012968
輻射強度[W/m ²]	1122.09	752.15

ここで重量を考慮した場合、航空機墜落による火災と同時にガソリントankが延焼する場合は輻射強度が大きくなり、航空機が落下後時間においてガソリントankが発火する場合は燃焼継続時間が大きくなることから、それらを包絡するように、評価を実施する（図 6 4）

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

航空機とガソリントankが同時に延焼する場合の輻射強度Eは、以下のとおり。

$$E = 1122.09 \text{ (ガソリントank)} + 752.15 \text{ (大型軍用航空機)}$$
$$= 1874.24$$

航空機が墜落後時間においてガソリントankが発火する場合の最大の燃焼継続時間tは、以下のとおり。

$$t = 9.11 \text{ (ガソリントank)} + 2.04 \text{ (大型軍用航空機)}$$
$$t = 11.15 \text{ [時間]}$$

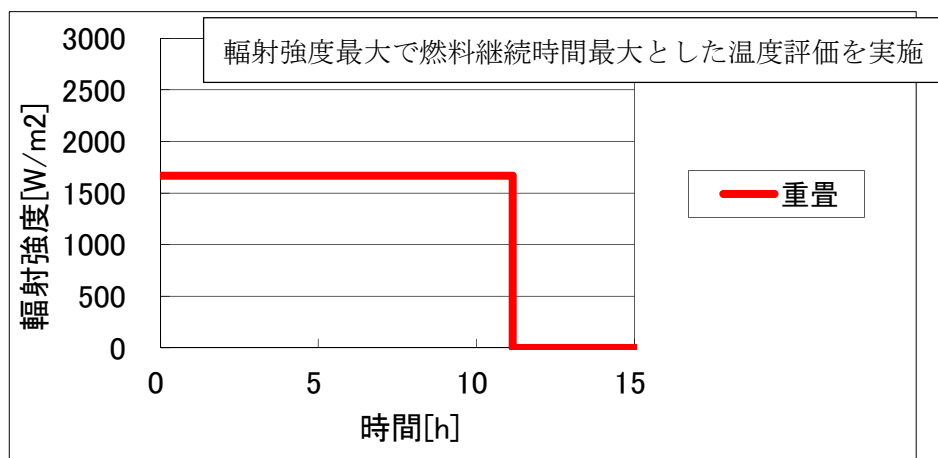
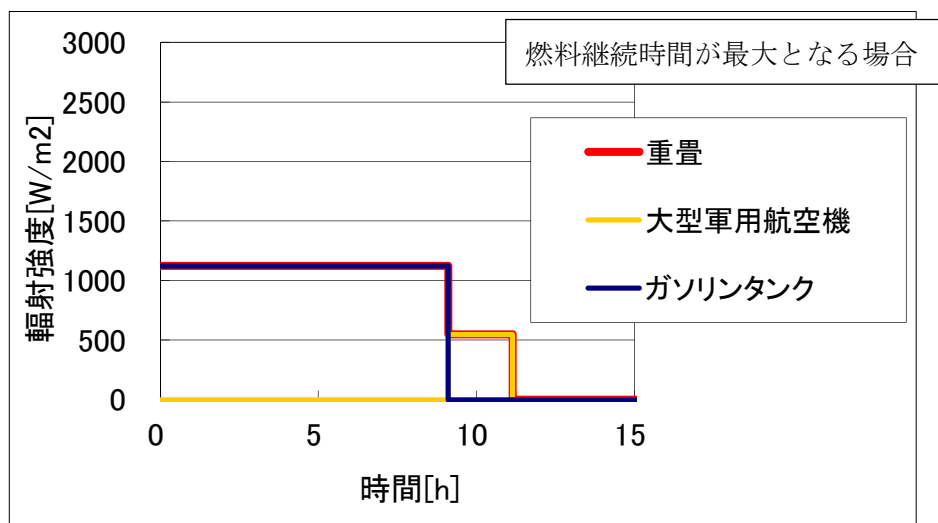
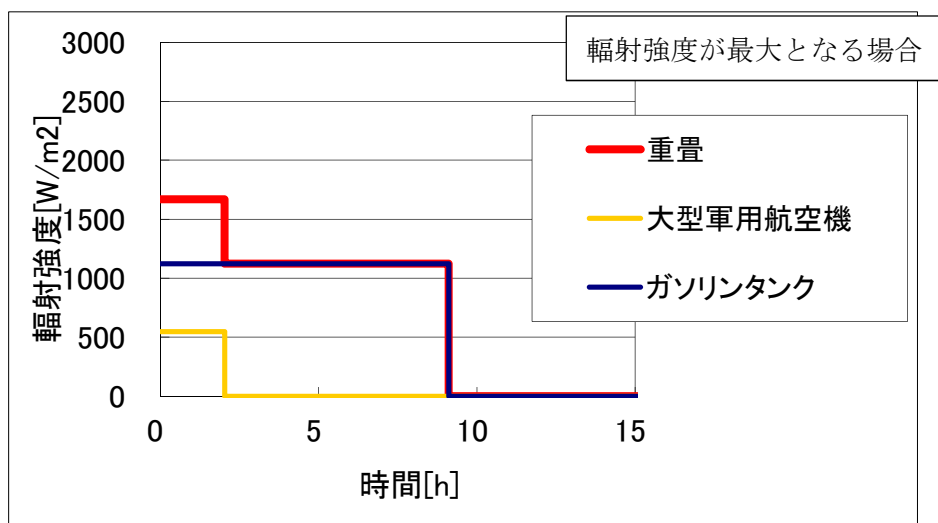


図6 4 重量を考慮した場合の輻射強度及び燃料継続時間の関係

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

(b) 耐火性能の評価結果

火災が発生した時間から燃料が燃え尽きるまでの間、一定の輻射強度でキャスク仮保管設備外壁が昇温されるものとして、下記の一次元非定常熱伝導方程式の解の式より、コンクリートの表面の温度上昇を求め、コンクリートの表面温度が許容限界温度以下であるか評価を実施する。

$$T_s = T_0 + \frac{1}{\left(\frac{\sqrt{k\rho c}}{1.18 h \sqrt{t}} + 1 \right)} \frac{h}{\varepsilon E}$$

出典：原田和典，建築火災のメカニズムと火災安全設計，日本建築センター

T_0 ：初期温度 [50°C]， E ：輻射強度 [W/m²]， ε ：コンクリート表面の放射率 (0.95)， h ：コンクリート表面熱伝達率 [34.9W/m²K]， k ：コンクリート熱伝導率 [1.6W/mK]， ρ ：コンクリート密度 [2200kg/m³]， c ：コンクリート比熱 [879J/kgK]， t ：燃焼継続時間 [s]

評価値は最新の情報に合わせ評価中

表 5 8 キャスク仮保管設備外壁面の温度評価結果

項目	ガソリントankと航空機の重畳
輻射強度 [W/m ²]	1874.24 (=1122.09+752.15)
燃焼継続時間 [hour]	11.15 (=9.11+2.04)
表面温度 [°C]	93

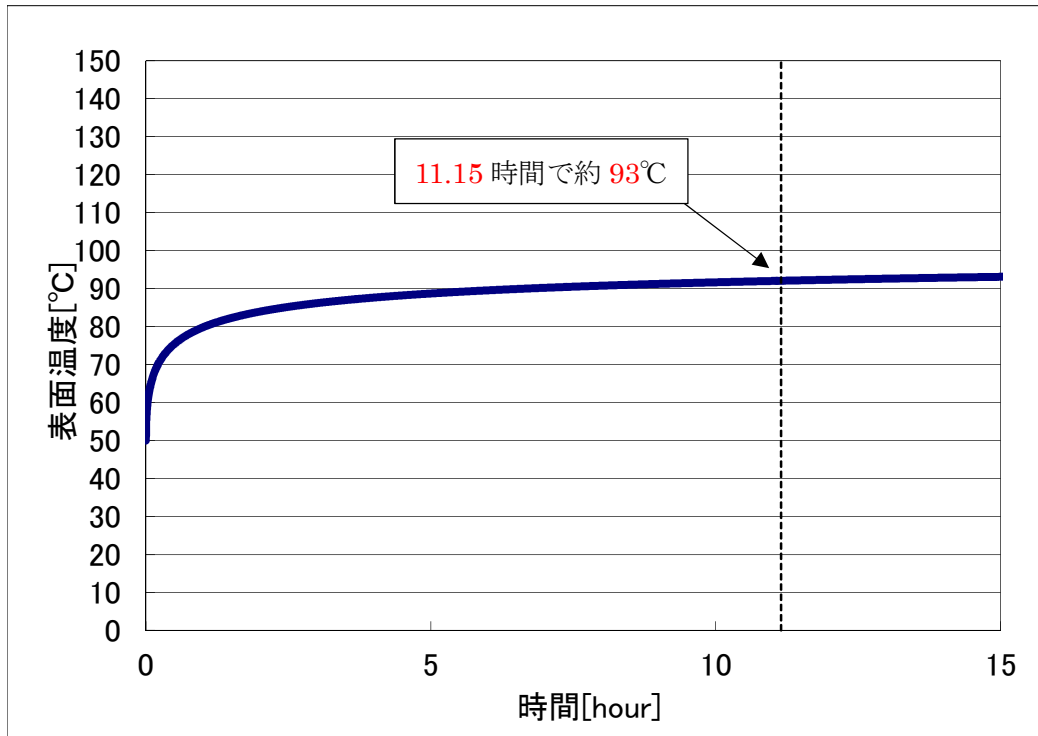


図 6.5 外壁面温度推移 (ガソリタンクと航空機の重量)

図及び評価値は最新の情報に合わせ評価中

(13) 評価結果

以上の結果から、航空機墜落による火災が発生した場合を想定したとしても、キャスク仮保管設備外壁面の温度が許容温度を超えないことから、キャスク仮保管設備に熱影響をおよぼすことはないと評価する。

コンクリートモジュール内部のキャスク本体に対する熱影響についても併せて評価する。キャスクへの熱影響は、中性子遮蔽材としての機能を持つレジンが熱影響により制限温度に到達するかを評価する。

レジンが熱分解反応を起こし遮蔽材としての機能を損なう温度は 220°C 以上であるため、キャスク表面が 220°C に到達しなければレジンへの影響は無いといえる。

航空機墜落によるコンクリートモジュール表面温度は約 93°C であり、2.1.2.5 の森林火災の熱影響の評価に包絡されることから、キャスク表面の温度が 220°C に到達することではなく、キャスク本体への熱影響はない。

□内の値は最新の情報に合わせ評価中

表 評価対象航空機の種類

		民間航空機		自衛隊機、在日米軍機
		計器飛行方式	有視界飛行方式	
固定翼 (ジェット旅客機等)	大型機	定期便：評価対象 (例) 大型旅客機 (B747、 B777 等)	定期便：該当なし	評価対象 自衛隊機 (F-4EJ 改、 F-15 等) 在日米軍機 (F-16、 F/A-18 等)
		不定期便：評価対象外 (注1)	不定期便：評価対象 (例) 海上保安庁のパトロール 機 (ビーチクラフト 90 型等) 民間の社有機 (三菱式 MU-300 型等) 等	
	小型機	定期便：評価対象外(注2)	定期便：評価対象外(注2)	評価対象 自衛隊機 (T-1 等)
		不定期便：評価対象(注3)	不定期便：評価対象 (例) 本土-離島間コミュータ (DHC-6、BN-2 等) 軽飛行機 (セスナ 172 等)	
回転翼 (ヘリコプター)	大型機	定期便：評価対象外(注2)	定期便：評価対象外(注2)	評価対象 自衛隊機 (MH-53 等) 在日米軍機 (CH-53 等)
		不定期便：評価対象(注3)	不定期便：評価対象 (例) 資材輸送 (ハール 214B、 AS332 等) 等	
	小型機	定期便：評価対象外(注2)	定期便：評価対象外(注2)	評価対象 自衛隊機 (OH-6 等) 在日米軍機 (UH-1 等)
		不定期便：評価対象(注3)	不定期便：評価対象 (例) 離島間コミュータ (SA365 等) 資材輸送、緊急医療、報 道用等 (アエロスハ°シアル AS350、川崎 BK117)	

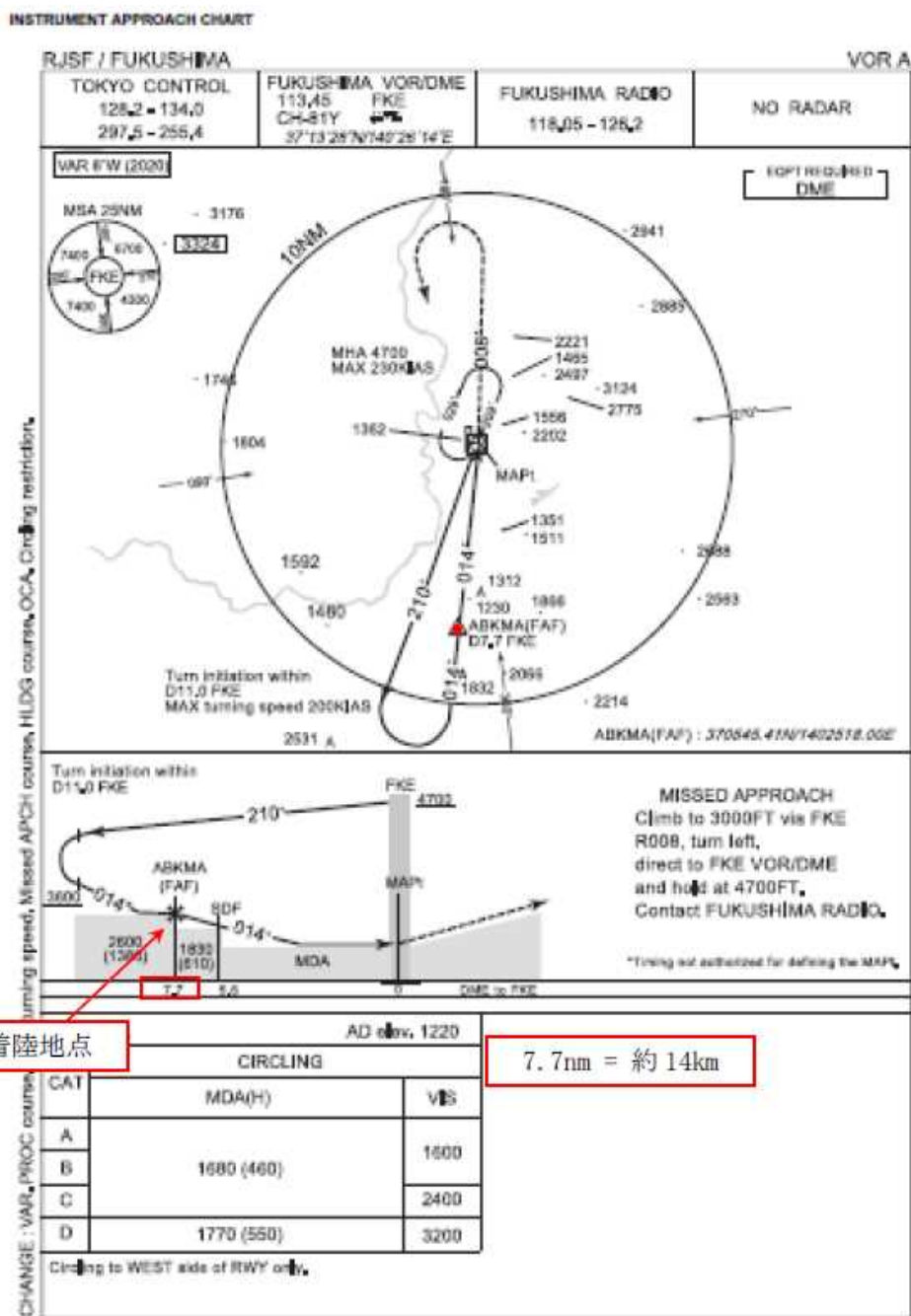
(注1) 計器飛行方式で飛行する大型固定翼機の不定期便は、定期便と比べて運航回数が極めて少ないことから、評価対象外とする。

(注2) 小型固定翼機及び回転翼機の定期便については、定期航空運送事業者の登録機数の割合から、運航頻度が大型機の定期便の数%であると判断できることから評価対象外とする。

(注3) 小型固定翼機及び回転翼機では、リクエストベースで計器飛行方式による飛行が可能となっているが、原則としては、有視界飛行方式による飛行形態を取っていることから、本基準では、全て有視界飛行方式として評価することとする。

※：実用発電原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について（内規）より抜粋

- 大型民間航空機（固定翼，回転翼）
- 小型民間航空機（固定翼，回転翼）
- 大型軍用航空機（固定翼，回転翼）
- 小型軍用航空機（固定翼，回転翼）



最大離着陸地点

7.7nm = 約 14km

図 福島空港のアプローチチャート

(出典：AIP-JAPAN，国土交通省航空局，令和5年4月)

表 主要自衛隊航空機の仕様

所属	形式	機種	保有数[機]	全長[m]	全幅[m]	燃料積載量[l]
陸上自衛隊	大型固定翼	LR-2	8	14	18	2040
	小型回転翼	AH-1S	48	14	3	980
	小型回転翼	OH-1	37	12	3	953
	小型回転翼	UH-1J	115	13	3	833
	小型回転翼	UH-2	1	13	3	1870※ ¹
	大型回転翼	CH-47J/JA	50	16	4/5※ ²	3899
	大型回転翼	UH-60JA	40	16	3	2722
	大型回転翼	AH-64D	12	15	6	1421
	ティールローター機	V-22	9	17	15	4449
海上自衛隊	大型固定翼	P-1	4	38	35	—※ ³
	大型固定翼	P-3C	75	36	30	34820
	大型固定翼	US-2	6	33	33	—※ ³
	大型回転翼	SH-60J	46	15	5	1361
	大型回転翼	SH-60K	39	16	5	1361
	大型回転翼	MCH-101	5	20	5	5250
航空自衛隊	大型固定翼	F-15J/DJ	201	19	13	11932kg
	大型固定翼	F-2A/B	92	16	11	4675※ ³
	大型固定翼	F-35A	27	16	11	10220
	大型固定翼	C-1	7	29	31	15709
	大型固定翼	C-2	14	44	44	—※ ³
	大型固定翼	C-130H	13	30	40	26344
	大型固定翼	KC-767	4	49	48	145033※ ¹
	大型固定翼	KC-130H	3	30	40	26344
	大型固定翼	E-2C	10	18	25	7002
	大型固定翼	E-2D	3	18	25	7002
	大型固定翼	E-767	4	49	48	—※ ³
	大型回転翼	CH-47J	15	16	5	3899
	大型回転翼	UH-60J	140	16	5	2722

令和 5 年版防衛白書より作成。燃料積載量は日本航空機全集 2013(鳳文書林), 世界航空機年鑑 2012-2013 (酣燈社) より。なお, 灰色で網かけした航空機は小型航空機。

※ 1 : 小型・大型航空機の燃料が最大のものになる

※ 2 : UH-1H, UH-1J の全長がそれぞれ 12, 13m, CH-47J, CH-47JA の全幅がそれぞれ 4, 5m を意味する

※ 3 : P-1 (哨戒), E-767 (早期警戒管制) の燃料積載量は不明だが, 機体サイズ及び用途を考えると, KC-767 (空中給油) より燃料補給機は少ないと推定する

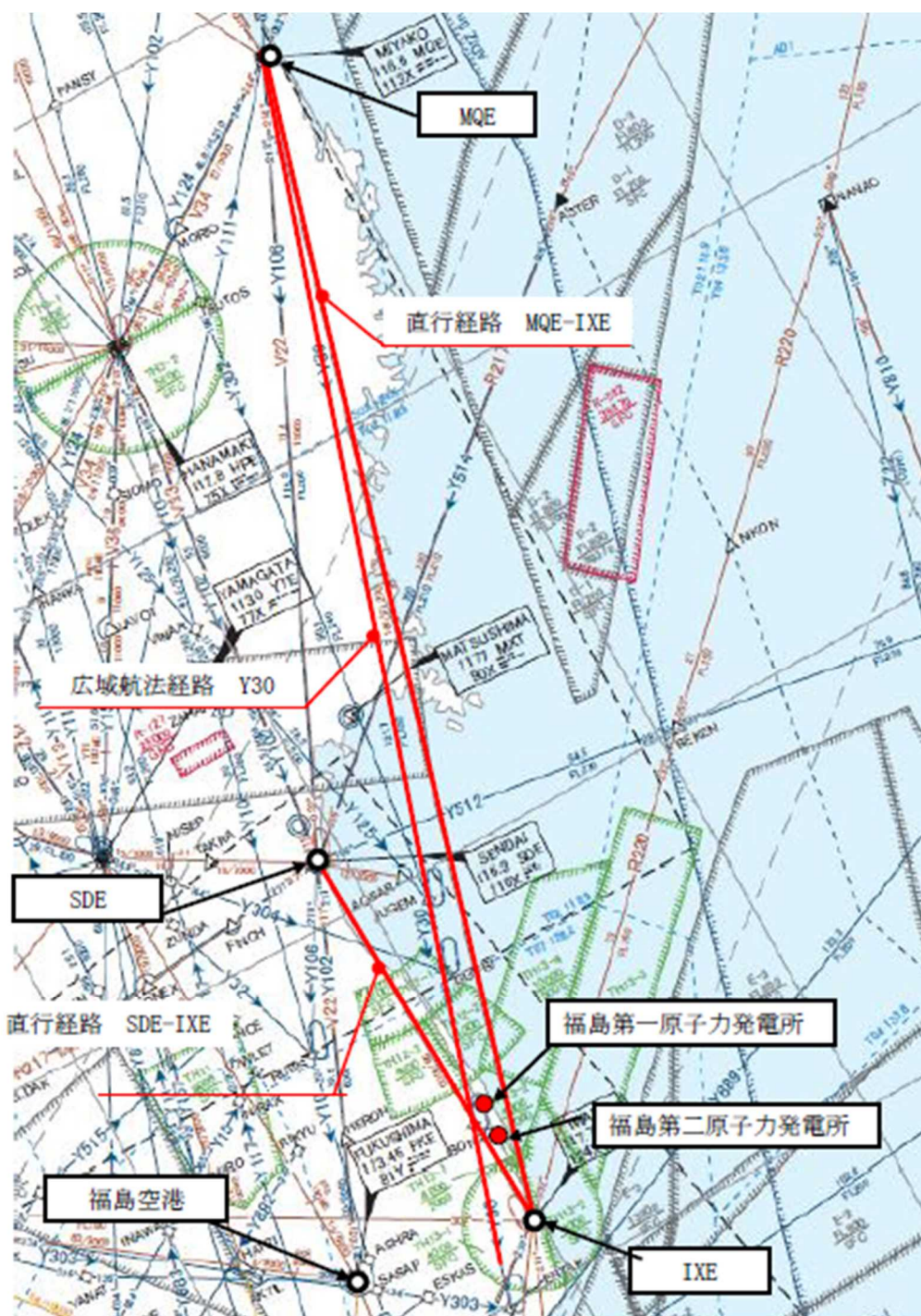


図 福島第一原子力発電所周辺の航空図

(出典：AIP-JAPAN，国土交通省航空局，令和5年4月)

表 飛行回数

福島第一原子力発電所

各航空交通 管制部 ピークデイ ^{注1}		広域航法経路 (Y30)	直行経路 MIYAKO (MQE) - IWAKI (IXE)	直行経路 SENDAI (SDE) - IWAKI (IXE)
札幌 管制	2022 年上半期 (2022. 6. 7) 交通量	16	0	0
	2022 年下半期 (2022. 8. 29) 交通量	25	0	0
東京 管制	2022 年上半期 (2022. 6. 23) 交通量	18	0	1
	2022 年下半期 (2022. 12. 21) 交通量	18	0	0
神戸 管制	2022 年上半期 (2022. 1. 7) 交通量	26	0	1
	2022 年下半期 (2022. 12. 20) 交通量	17	0	0
評価に用いる数値		26×365 日 =9490 便/年 間	0.5×365 日 =182.5 便/ 年間 ^{注2}	1×365 日 =365 便/ 年間

注1：国土交通省航空局に問い合わせ入手したデータ。ここでピークデイとは、各航空交通管制部が全体として取り扱った交通量が半年間で最も多かった日のことであり、当該経路における交通量が半年間で最も多かった日とは必ずしも一致しない。

注2：実際の便数は0であるが、保守的に0.5とする。

表 標的面積

単位：km²

発電所	対象	合計	標的面積
福島第一原子力発電所	キャスク仮保管設備	0.006990	0.01

機器配置図寸法から面積を算出した。

延べ飛行距離について

延べ飛行距離は、平成 13 年～令和 2 年の「航空輸送統計年報，第 1 表 総括表，1. 輸送実績」における運航キロメートルの国内便のみの合計値とする。

なお，国際便については，日本国内での運行距離ではないため考慮していない。また，日本に乗り入れている外国機は運行距離の実績の公開記録がないため考慮していない。

ただし，国際便及び外国機が日本国内で墜落した場合は事故件数としてカウントし，事故率が保守的となるようにしている。

表 運航距離

	日本国機の運行距離 (飛行回・k m)
平成 13 年	489,803,107
平成 14 年	498,685,881
平成 15 年	519,701,117
平成 16 年	517,485,172
平成 17 年	527,370,038
平成 18 年	555,543,154
平成 19 年	559,797,874
平成 20 年	554,681,669
平成 21 年	544,824,157
平成 22 年	548,585,258
平成 23 年	555,144,327
平成 24 年	608,215,704
平成 25 年	657,480,703
平成 26 年	680,472,532
平成 27 年	684,055,797
平成 28 年	685,451,299
平成 29 年	691,345,014
平成 30 年	692,529,394
令和元年	705,489,833
令和 2 年	482,751,536
合 計	11,759,413,566

FARSITE

FARSITE (Fire Area Simulator) は、世界で最も高機能かつ広く用いられている森林火災シミュレーションモデルの一つであり、米国農務省 USDA Forest Service で開発され、米国内の森林火災において実践的に利用されている。

- ◆ホイヘンスの原理に基づく火災の拡大に加え、樹冠火、加速、飛び火等に関する追加的なモデルによる統合的な解析が可能
- ◆空間的な環境条件の変化に従い火災の拡大・強度に関するパターンを地理情報により空間的に提示することが可能

ホイヘンスの原理に基づく火災拡大のモデルには多くの事例がある (Coleman and Sullivan 1996; Finney 1994; Finney and Ryan 1995; Knight and Coleman 1993; Richards and Bryce1995) が、FARSITE では Richards (1990, 1995) によって開発された火災拡大モデルを用いている。また、FARSITE では、地表を伝播する火災、樹冠を伝播する火災、伝播の加速、飛び火の4つの挙動を別々に取り扱うことができる。具体的には、以下のモデルを採用している。

挙動タイプ	使用モデル
地表を伝播する火災	Rothermel の拡大方程式 (Albini 1976; Rothermel1972) に基づく。
樹冠を伝播する火災	Van Wagner (1977, 1993) に基づく。 CanadianForest Fire Behavior Prediction System (Forestry Canada Fire Danger Group 1992) と同様。
伝播の加速	Cheney (1981), Cheney and Gould (1997) に基づく。発火燃料の追加, 燃料の乾燥化, 風速の増加に起因する。
飛び火	Albini の方程式 (1979) に基づく。

1. 延焼速度

$$R = \frac{60I_R\xi(1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b\varepsilon Q_{ig}}$$

R : 延焼速度 (m/min)

I_R : 放射熱 (反応強度) (kW/m²)

ξ : 反応強度のうち隣接可燃物の加熱に使われる割合

ϕ_w : 風速係数

ϕ_s : 傾斜角係数

ρ_b : 可燃物の堆積密度 (kg/m³)

ε : 着火温度まで加熱される可燃物の割合

Q_{ig} : 可燃物が着火するのに必要な熱量 (kJ/kg)

$$Q_{ig} = 581 + 2594M_f \quad (M_f : \text{可燃物の含水比})$$

2. 火線強度

$$I_B = I_R \frac{12.6R}{\sigma}$$

I_B : 火線強度 (kW/m)

σ : 可燃物の表面積/体積比 (cm⁻¹)

3. 火炎長

$$L_f = 0.0775I_B^{0.46} \quad L_f : \text{火炎長 (m)}$$

4. 単位面積当り熱量

$$H_A = I_B \frac{60}{R}$$

H_A : 単位面積当り熱量 (kJ/m²)

5. 火炎輻射強度

$$I_R = \frac{1}{60} \Gamma' w_n h \eta_M \eta_S$$

I_R : 火炎輻射強度 (kW/m²)

Γ' : 理想熱分解速度 (1/min)

w_n : 可燃物単位面積当りの乾燥重量 (kg/m²)

h : 発熱量 (kJ/kg)

η_M : 可燃物中の水分による熱分解速度減少係数 (-)

η_S : 可燃物中の無機物による熱分解速度減少係数 (-)

一方、FARSITE を利用する上での留意事項としては、以下が挙げられる。

- ◆煙の発生について考慮されていない
- ◆生体燃料の水分量の多様性については考慮されていない
- ◆気象・風の条件については一地点のデータのみを入力となる
- ◆空間的な環境条件の影響は使用データの空間解像度に依存することから、目的に応じた適切なデータを選定する必要がある
- ◆市街地等の非植生域については評価を行えないため、非植生域は一種の防火帯として作用する。

具体的な評価指標と観点を以下に示す。

評価指標	評価の観点
1. 延焼速度[km/h]	火災発生後、どの位の時間で施設に到達するのか 消火活動が可能な時間はどの程度か
2. 火線強度[kW/m]	施設に到達し得る火災の規模はどの程度か 必要となる消火活動の能力や防火帯の規模はどの程度か
3. 火炎長[m]	
4. 単位面積当り熱量[kJ/m ²]	
5. 火炎輻射強度 (kW/m ²)	

上記の評価指標は、現地の土地利用（森林、農地、居住地等の分布）、地形（標高、傾斜角度等）、気象条件（風向・風速、気温、湿度等）に大きく依存することから、これらを可能な限り考慮した評価を行う必要がある。

FARSITE の計算実行に最低限必要な入力ファイルを示す。

入力ファイル名	内容
6. ラスタ入力ファイル	標高データ (Elevation) 傾斜角データ (Slope) 傾斜方向データ (Aspect) 可燃物データ (Fuel Model) 樹冠率データ (Canopy Cover)
7. その他入力ファイル	火災伝播速度の制御 (Adjustment) Fuel 水分初期値 (Fuel Moisture) 気象要素 (Weather) 風速 (Wind)

FARSITE において採用しているホイヘンスの原理に基づく火災の拡大モデルを図 1 に示す。

図 1 の A は可燃物の燃焼特性，風速及び風向が一様である場合の火災の拡大を示しており，図 1 の B は可燃物の燃焼特性，風速及び風向が場所によって異なる場合の火災の拡大を示している。

可燃物の燃焼特性，風速及び風向が一様の場合は，各素元波（素元波とは波面上の各点から出る球面波のことである。）の包絡線は楕円形を維持する。可燃物の燃焼特性，風速及び風向が場所によって異なる場合は，燃焼特性及び風速によって素元波の成長速度が増減し，風向によって素元波の成長方向が決定される。

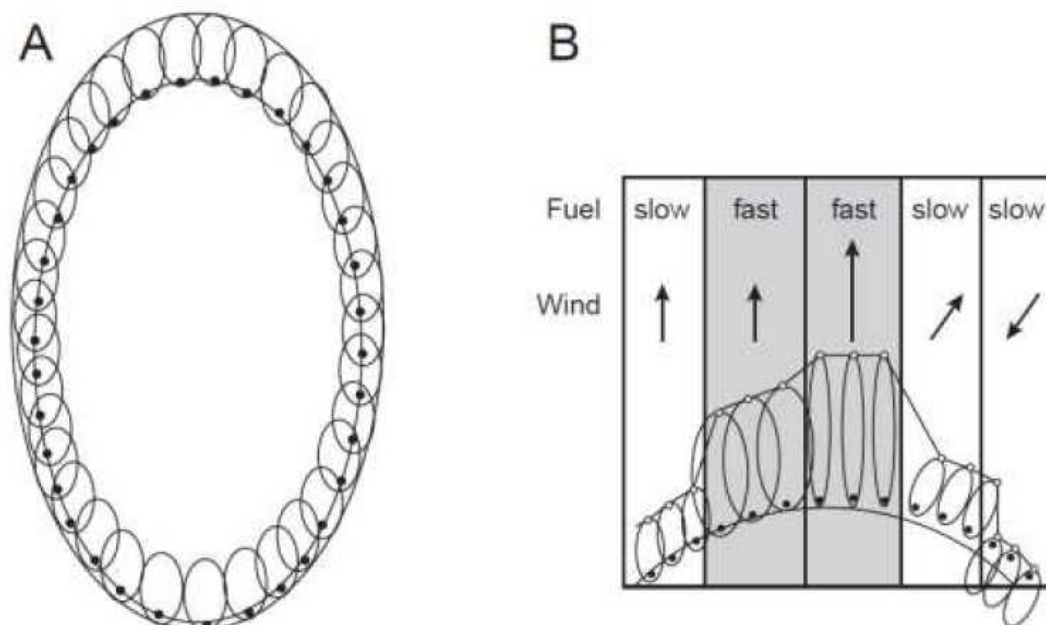


図 1 FARSITE の火災拡大モデル

(Mark A. Finney, 2004, “FARSITE: Fire Area Simulator—Model Development and Evaluation”, p. 3 より引用)

航空機墜落による火災の影響評価に用いたデータについて

1. 航空機の仕様について

表 1 航空機の仕様

項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
想定する航空機	A380	Do228-200	KC-767	UH-2
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
燃料量[m ³]	320.00 ¹⁾	2.38 ²⁾	145.03 ³⁾	1.87 ⁷⁾
燃料タンク面積[m ²]	871 ⁴⁾	26 ⁵⁾	280 ⁶⁾	12 ⁷⁾

- 1) Dimension & key data, Airbus 社ホームページ
- 2) 日本航空機全集 2013, (鳳文書林出版販売(株) 発行) 記載値
- 3) 世界航空機年鑑 2012-2013 に記載の燃料重量及び燃料密度(NUREG-1806)から算出した値
- 4) Airbus 社ホームページ資料「A380 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING」の機体図面より, 主翼, 主翼と交差する胴体部及び尾翼の面積からフラップ等の面積を除いた面積が燃料タンク面積と同等と想定し算出した値(図1)。
- 5) 日本航空機全集 2013 に記載の図面から, 主翼及び主翼と交差する胴体部の面積からフラップ等の面積を除いた面積が燃料タンク面積と同等と想定し算出した値(図2)
- 6) ボーイング社ホームページ資料「767 Airplane Characteristics for Airport Planning」の機体図面より, KC-767 のベースとなっている航空機 B767-200ER の主翼, 主翼と交差する胴体部及び補助燃料タンクが搭載される床下貨物室の面積からフラップ等の面積を除いた面積を燃料タンク面積として算出した値(図3)
- 7) Bell Flight 社ホームページ資料「SUBARU BELL 412EPX SPECIFICATIONS」の機体図面より, UH-2 のベースとなっているヘリコプター「SUBARU BELL 412EPX」の機体の投影面積を燃料タンク投影面積と同等と想定した値(図4)

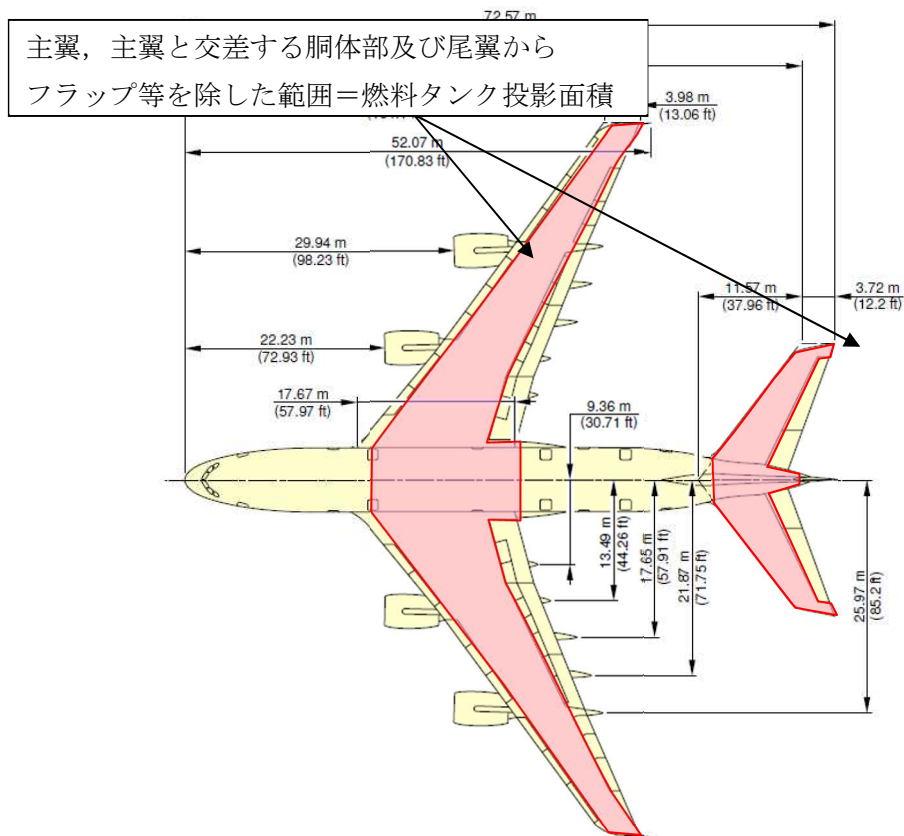


図1 燃料タンク投影面積(B747-400)

(出典 : A380 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING)

主翼及び主翼と交差する胴体部からフラップ等
を除いた範囲=燃料タンク投影面積

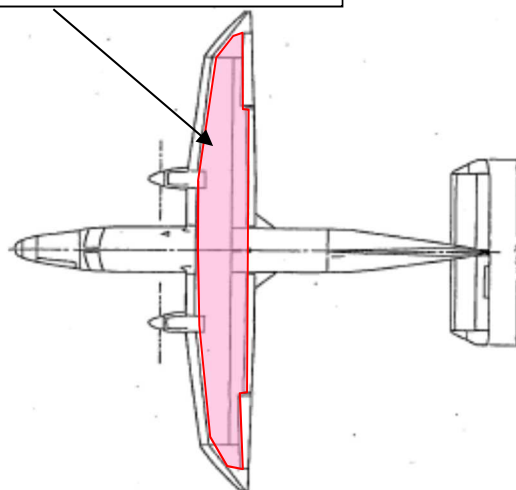


図2 燃料タンク投影面積(Do228-200)

(出典 : 日本航空機全集 2013)

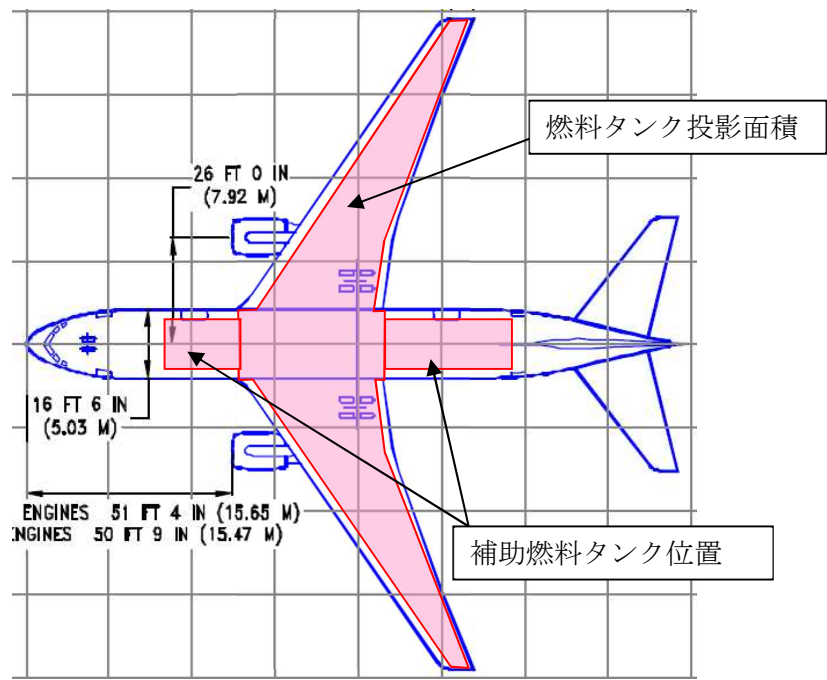


図3 燃料タンク 投影面積(KC-767)

(出典：767 Airplane Characteristics for Airport Planning)

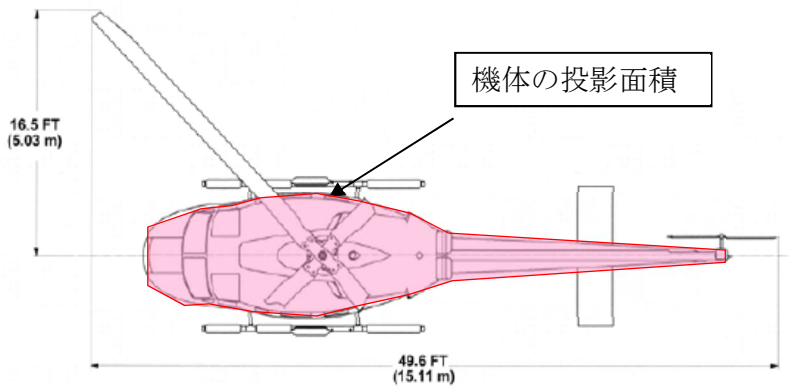


図4 燃料タンク 投影面積(UH-2)

(出典：SUBARU BELL 412EPX SPECIFICATIONS)

2. 燃料物性値について

ジェット燃料は、JIS 規格では 1 号の灯油型（低析出点）、2 号灯油型及び 3 号広範囲沸点型（ガソリン型）の 3 種類があり、ASTM 規格の Jet A-1, Jet A, Jet B に相当する。また、MIL 規格では、JP-4(ガソリン型)、JP-5（灯油型）や JP-8（灯油型）があり、日本の民間航空機では安全性の高い 1 号（灯油型）が使用されており※¹、軍用航空機では JP-4 が使われている※²。よって、民間航空機の燃料の種類は Jet A-1（灯油型）、軍用航空機は JP-4 とする。

火災影響評価において使用する燃料物性値のうち、輻射発散度及び質量低下速度については、Jet A-1 燃料に関する明確な知見がない。このため、Jet A-1 は灯油型であることから、輻射発散度は灯油の値を採用する。

また、Jet A-1 の質量低下速度、密度については、NUREG-1805 において、JP-4、JP-5 の質量低下速度、密度が与えられていることから、同じ灯油型である JP-5 の値を採用する。なお、JP-5 の方が JP-4 より燃焼速度が遅く、燃焼継続時間が長くなるので保守的である。

軍用航空機の燃料（JP-4）は、ガソリン系の燃料であることから、輻射発散度はガソリン・ナフサの値を採用し、質量低下速度、密度は、NUREG-1805 の JP-4 の値を採用する。

※ 1：公益社団法人 石油学会 HP

※ 2：石油便覧 JX 日鉱日石エネルギーHP

表 2 評価対象航空機の燃料物性値

項目	大型 民間航空機	小型 民間航空機	大型 軍用航空機	小型 軍用航空機
想定する航空機	A380	Do228-200	KC-767	AH-1S
燃料の種類	Jet A-1	Jet A-1	JP-4	JP-4
輻射発散度[kW/m ²]	50.0 ¹⁾	50.0 ¹⁾	58.0 ²⁾	58.0 ²⁾
質量低下速度[kg/m ² ・s]	0.054 ³⁾	0.054 ³⁾	0.051 ⁴⁾	0.051 ⁴⁾
燃料密度[kg/m ³]	810 ³⁾	810 ³⁾	760 ⁴⁾	760 ⁴⁾
燃焼速度[m/s]	6.666×10 ⁻⁵	6.666×10 ⁻⁵	6.710×10 ⁻⁵	6.710×10 ⁻⁵

1) 評価ガイド 附属書Bにおける灯油の値

2) 評価ガイド 附属書Bにおけるガソリン・ナフサの値

3) NUREG-1805, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program に記載の JP-5(灯油型)の値

4) NUREG-1805, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program 5 に記載の JP-4(ガソリン型)の値
NUREG-1805 より抜粋。

参考文献

- [1] 福島県農林水産部 森林簿（平成 24 年度樹立）
- [2] 米国農務省（USDA Forest Service）FARSITE Technical Reference.
- [3] 国土交通省国土地理院（2016） 基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュデータ
<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>
- [4] 環境省自然環境局（1979～1998）自然環境保全基礎調査 植生調査データ（1/50,000 縮尺）第 2～5 回植生調査
<http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-023.html>
- [5] 国土交通省（2016） 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- [6] 東京電力ホールディングス 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 外部火災影響評価について. 6 条-別添 4(外火)-1.
- [7] 環境省 中間貯蔵施設環境安全委員会第 15 回会合
資料 1「中間貯蔵施設事業の状況について（2019 年 8 月）」
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/safety_commission/#article15
- [8] 独立行政法人原子力安全基盤機構（2012） 福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価, JNES-RC-2012-0002.
- [9] 養蚕技術研究所 養蚕 第 1 章 養蚕と養蚕業.
http://www.silk.or.jp/silk_gijyutu/yousan.html
- [10] 消防庁 消防白書（2010 年度版～2019 年度版）
<https://www.fdma.go.jp/publication/#whitepaper>
- [11] 福島県 農林企画課 福島県農林水産業の現状（令和元年 7 月版）
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36005b/norinkikaku2.html>
- [12] 気象庁 各種データ資料
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- [13] 国土交通省国土地理院 福島県 市区町村の役所・役場及び東西南北端点の経度緯度（世界測地系）
https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/CENTER/kendata/fukushima_heso.pdf
- [14] 井上宇市（2018） 空気調和ハンドブック改訂 5 版, 丸善出版
- [15] 日本機械学会 伝熱工学資料（第 5 版）

Ⅱ.14.② 竜巻に対する設計上の考慮への適合性

措置を講ずべき事項

II. 設計，設備について措置を講ずべき事項

14. 設計上の考慮

②自然現象に対する設計上の考慮

- ・安全機能を有する構築物，系統及び機器は，その安全機能の重要度及び地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して，耐震設計上の区分がなされるとともに，適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること。
- ・安全機能を有する構築物，系統及び機器は，地震以外の想定される自然現象（津波，豪雨，台風，竜巻等）によって施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度の特に高い安全機能を有する構築物，系統及び機器は，予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件，又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。

措置を講ずべき事項への適合方針

(2)自然現象に対する設計上の考慮

- ・安全機能を有する構築物，系統及び機器は，地震以外の想定される自然現象（津波，豪雨，台風，竜巻等）によって施設の安全性が損なわれないものとする。その際，必要に応じて多様性も考慮する。重要度の特に高い安全機能を有する構築物，系統及び機器は，予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件，又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮したものとする。

(実施計画：II-1-14-1)

対応方針

2.13.1.6 自然災害対策等

(3) 台風・竜巻

乾式キャスクは基礎に据え付けられ，コンクリートモジュールの中に保管されているため，台風・竜巻の影響を受けない。

(実施計画：II-2-13-3～4)

具体的な設計

キャスク仮保管設備の竜巻防護において、措置を講ずべき事項を満たすにあたって適用する主な関連規則等及び設計要求事項は下記の通り。

○主な関連規則等

- ・ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成二十五年原子力規制委員会規則第五号）（以下、「設置許可基準規則」という）
- ・ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 1306193 号 原子力規制委員会決定）
- ・ 兼用キャスクが安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる地震力等を定める告示（平成 31 年原子力規制委員会告示第 2 号。以下「兼用キャスク告示」という。）
- ・ 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド（平成 31 年 3 月 13 日 原規技発第 1903131 号 原子力規制委員会決定）（以下「兼用キャスクガイド」という。）
- ・ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 13061911 号原子力規制委員会決定）（以下「竜巻ガイド」という。）

○設計要求事項

1 竜巻防護機能

竜巻が発生した場合においても安全機能を損なわないこと。

- ・ 兼用キャスクは、次に掲げる自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

兼用キャスクが竜巻により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの（設置許可基準規則第六条第 4 項）

- ・ 第 6 条第 4 項に規定する「自然現象」については、以下のとおりとする。

第 1 号に規定する「兼用キャスクが竜巻により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかにかわらず判断するために用いる合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの」については、次のとおりとする。

- ・ 兼用キャスク告示第 3 条によるものとする。
- ・ 竜巻による飛来物の衝突に対して、その安全機能を損なわないものであること。

（設置許可基準規則の解釈別記 4 第 6 条第 2 項第 1 号）

- ・ 第三条設置許可基準規則第六条第四項第一号の原子力規制委員会が別に定める竜巻は、

風速が百メートル毎秒である竜巻とする。(兼用キャスク告示第3条)

・(1) 設置許可基準規則第6条第4項に規定する兼用キャスク告示で定める竜巻として、設置許可基準規則の解釈別記4第6条第2項第1号に基づき、設計竜巻(原子力発電所の竜巻影響評価ガイド「1.4 用語の定義」に規定する「設計竜巻」をいう。以下同じ。)の最大風速を以下のとおり定め、設計荷重を設定していること。

・最大風速 : 100m/s

(2) 設計荷重の設定に用いる設計飛来物は、竜巻ガイド解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定していること。

(兼用キャスクガイド4.2.3)

・(2) 設計飛来物の設定例

解説表 4.1 飛来物及び最大速度の設定例 ($V_D=100(m/s)$ の場合)

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
サイズ(m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量(kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度 MV_{Hmax} (m/s)	49	51	30	60	34
最大鉛直速度 MV_{Vmax} (m/s)	33	34	20	40	23

(竜巻ガイド解説表4.1)

○安全評価

1. 基本方針

基本方針を以下に示す。

- (1) 兼用キャスク告示に定める竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重を組み合わせた荷重条件に対して、キャスクの安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。
- (2) キャスクはコンクリートモジュールの中に保管され、コンクリートモジュールによる防護およびキャスク単体の構造により安全機能を維持する設計とする。
- (3) 兼用キャスク告示に定める竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重を組み合わせた荷重条件に対して、キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する密封境界部は、おおむね弾性状態に留まるように設計し、臨界防止機能を担保するバスケットについては、臨界防止上有意な変形が生じないように設計する。その他の部位

については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に対して十分な余裕を有する等、キャスクの安全機能を維持する設計とする。キャスクに衝突し得る設計飛来物は、竜巻ガイドを踏まえて、飛来物の種類、寸法、質量及びその最大速度を設定した設計飛来物および、キャスク仮保管設備の周囲に存在する想定飛来物を設定する。

2. 設計方針

兼用キャスク告示に定める竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重を組み合わせた荷重（以下「竜巻荷重」という。）に対して、キャスクの安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。最初にキャスク単体の構造による評価を実施し、安全機能の維持が見込めない場合は、コンクリートモジュールによる竜巻荷重の低減効果を見込み、安全機能を維持する設計とする。

また、竜巻荷重の条件に対して、キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する密封境界部は、おおむね弾性状態に留まるように設計し、臨界防止機能を担保するバスケットについては、臨界防止上有意な変形が生じないように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に対して十分な余裕を有する等、キャスクの安全機能を維持する設計とする。

評価フローを図2に示す。

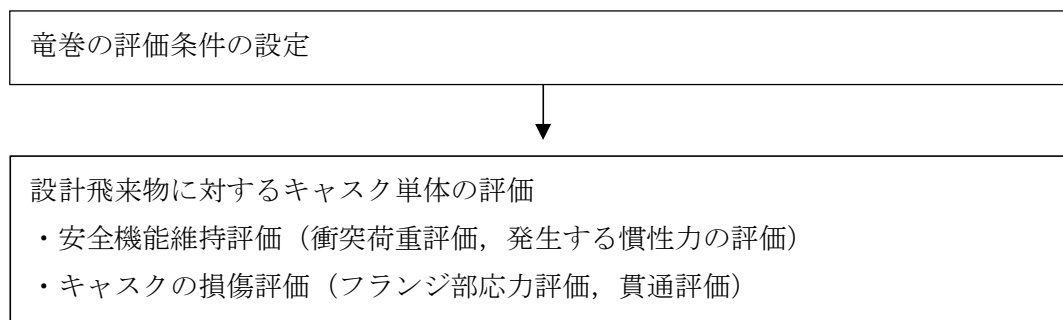


図2 評価フロー

3. 評価条件

3.1 竜巻条件

竜巻荷重として、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重を組み合わせた複合荷重を考慮し、キャスクに作用する竜巻荷重を算定する。竜巻の評価条件を表3.1に示す。

表3.1 竜巻の評価条件

事象	評価条件
竜巻	最大風速 100 m/s ^{※1}

※1 兼用キャスク告示に定められる評価条件

3.2 設計飛来物

設計飛来物については、竜巻ガイド 解説表 4.1 表(1)に示される 5 種類およびキャスク仮保管設備の周囲に存在する設備・仮置き物品等（現在評価中のため本資料においては未記載）とし、表 3. 2 に示す。

他の原子力施設において許認可実績がある飛散評価ツール TONBOS（フジタモデルを適用）を使用し、設計飛来物の最大水平速度，最大鉛直速度および最大飛距離等を評価する。表 3. 2 に示す最大飛距離の評価結果より，最大飛距離が 0m である鋼製パイプおよびコンクリート板はキャスク仮保管設備への衝突事象は発生しない。最大飛距離が 2.12m であるトラックについては，キャスク仮保管設備の周囲 2.12m 以内に仮置きされていないため，衝突事象は発生しないと考えられ，対象外とできるが影響確認のため 4 項，5 項において評価を実施する。

内の数値は評価中のため参考値

□ 内の数値は評価中のため参考値

表 3. 2 設計飛来物について

飛来物の種類		サイズ(m) ^{※1}			質量(kg) ^{※1}	最大水平速度 ^{※2} M _{VHmax} (m/s)	最大鉛直速度 ^{※2} M _{VMmax} (m/s)	最大飛距離 ^{※2} (m)
		長さ	幅	高さ				
棒状物	鋼製パイプ	2	0.05	0.05	8.4	0	0	0
	鋼製材	4.2	0.2	0.3	135	15.0	1.35	9.83
板状物	コンクリート板	1.5	1	0.15	540	0	0	0
塊状物	コンテナ	6	2.4	2.6	2300	54.4	14.3	191
	トラック	5	1.3	1.9	4750	6.24	0.270	2.12
※キャスト仮保管設備周辺の 飛来物を追加予定								

※1 サイズおよび質量は竜巻ガイド解説表 4.1 と同じ。

※2 評価ツール TONBOS ver 3 (電力中央研究所作成の評価ツール) を用いて評価。

4 安全機能維持評価

4.1 評価部位

竜巻飛来物との衝突事象において、キャスクの安全機能を担保する構成部材が損なわれな
いことを確認する。キャスクの安全機能を担保する構成部材を表4. 1に示す。

表4. 1 キャスクの安全機能に影響する部位

評価部位	主要な安全機能	安全機能の内容	許容基準
一次蓋	閉じ込め機能 遮蔽機能	・ 密封境界を構成する部位である ・ 主要なガンマ線遮蔽体及び中性子遮蔽体の保持機能を有する	おおむね弾性範囲に留まること
一次蓋シール部	閉じ込め機能	・ 密封境界を構成する部位である	同上
一次蓋ボルト	閉じ込め機能	・ 密封境界を構成する部位である	同上
二次蓋	遮蔽機能	・ 主要なガンマ線遮蔽体の一つである	同上
外筒	遮蔽機能 除熱機能	・ 中性子遮蔽材であるレジンを保持する部位であり、かつ、伝熱部材である伝熱フィンが取り付けられる部位である	同上
バスケット	臨界防止機能	・ 使用済燃料の幾何学的配置を維持し、臨界を防止する部位である	臨界防止機能に影響する変形が生じないこと

4.2 衝突荷重評価

表3. 2で示された設計飛来物がキャスクと衝突した際に発生する衝突荷重を評価する。ここでは、設計飛来物に対し、キャスクが十分に剛であると見なして評価する。設計飛来物による衝突荷重は、建築物の耐衝撃設計の考え方^②に記載の方法を参考に、以下の設計飛来物の圧壊挙動を無視した Riera の式^③を使用する。ここでは、

$$P(t) = P_b[x(t)] + \mu[x(t)]v^2(t) \quad (1)$$

ここで、

$P(t)$: 衝突荷重(N)

$P_b(x)$: 先端から距離 x における圧潰力(N)

$\mu(x)$: 先端から距離 x における単位長さ当たりの質量(kg/m)

$v(t)$: 時刻 t における衝突速度(m/s)

である。

航空機の衝撃試験に関する報告書によれば、機体の破壊強度が衝撃荷重に与える影響は比較的小さく、質量の慣性力が支配的となり、衝突荷重の時刻歴の形状は、機体の質量分布に依存する^②。同様に考え、式(1)の第1項を無視できるとすると、式(1)は次のように求めら

れる。

$$P(t) = \mu[x(t)]v^2(t) \quad (2)$$

ここで、飛来物の質量分布が長さLにわたって一定とし、さらに衝突速度が一定（衝突荷重の時刻歴を矩形波として近似）と仮定すると、式(2)は次のように求められる。

$$P = \frac{m}{L}v^2 \quad (3)$$

ここで、

m：飛来物の質量(kg)

L：飛来物の衝突方向長さ(m)

である。

一方、設計飛来物の質量分布を考慮して、質量分布の形状に三角形を仮定した場合、式(2)は次のように求められる。

$$P = \frac{2m}{L}v^2 \quad (4)$$

表3. 2に示す設計飛来物の条件を用いて衝突荷重を求める。本評価では、設計飛来物の質量が大きく、設計飛来物の構造上、質量分布を無視できないコンテナ及びトラックについては、式(4)を用いて衝突荷重を評価し、質量分布が比較的一様と想定されるそれ以外の飛来物については、式(3)を用いて衝突荷重を評価する。衝突荷重の計算結果を表4. 2-1に示す。

当該衝突荷重は、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（外運搬規則）の技術上の要件である一般の試験条件（以下「一般の試験条件」という。）においてキャスクに作用する設計荷重（0.3 m 水平落下時）より小さいため、キャスクの安全機能は維持される。

□ 内の数値は評価中のため参考値

表4. 2-1 衝突荷重の計算結果

飛来物の種類	評価結果	許容基準
	衝突荷重P (MN)	作用する荷重(MN)
鋼製パイプ	0.00	25.8 ^{**3}
鋼製材	0.15	
コンクリート板	0.00	
コンテナ	5.66 ^{**1}	
コンテナ (竜巻による荷重を考慮)	5.74 ^{**2}	
トラック	0.28 ^{**1}	
※キャスク仮保管設備周辺の 飛来物を追加予定		

※1 式(4)を用いて衝突荷重を算出。

※2 竜巻による荷重のうち、風圧力による荷重は以下の式を用いて求め(0.08(MN))、コン

テナの衝突荷重に考慮した。なお、キャスクの構造強度評価は、キャスクの外部とキャスク本体内部の気圧差を包絡できる胴内圧条件で評価を行うことから、気圧差による荷重は考慮しない。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで、

W_w : 風圧力による荷重(N)

q : 設計用速度圧(kg/(m・s²)) $q = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2$

G : ガスト影響係数 (= 1.0^{*4})

C : 風力係数 (= 1.0^{*5})

A : 受圧面積(= 13.20^{*6} m²)

ρ : 空気の密度(= 1.22^{*7} kg/m³)

V : 設計竜巻の最大風速(= 100 m/s)

※4 竜巻の最大風速は最大瞬間風速であり、1.0とする。

※5 建築物荷重指針・同解説(2015)⁽⁴⁾に示される円形平面への風力係数である。

※6 キャスクの水平方向に垂直な平面への投影面積である。

※7 建築物荷重指針・同解説(2015)⁽⁴⁾に示される空気の密度である。

※3 一般の試験条件 (0.3 m 水平落下時) のキャスクに作用する設計荷重を許容基準とする。キャスク仮保管設備において設置するキャスクと同じ構造である HDP-69B 型(2A)の核燃料輸送物設計承認申請書 (SAR) より設計荷重の考え方を以下に示す。

0.3m 水平落下時の衝撃加速度の検討条件として、輸送物の落下エネルギーの計算結果を表 4. 2-2 に示す。落下エネルギーは以下の式を用いて求める。

$$E_K = m \cdot g \cdot H$$

ここで、

E_K : 輸送物の落下エネルギー (N・mm)

m : 輸送物最大総重量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s²)

H : 落下高さ (mm)

□ 内の数値は評価中のため参考値

表 4. 2-2 輸送物の落下エネルギー^{*8}

項目	輸送物最大総重量 m(kg)	重力加速度 g(m/s ²)	落下高さ H(mm)	輸送物の落下エネルギー E _K (N・mm)
数値	1.318×10 ⁵	9.80665	300	3.88×10 ⁸

※8 核燃料輸送物設計承認申請書 (SAR) (ロ)-第 A.17 表

輸送物の落下エネルギーは緩衝体の弾塑性変形によって全て吸収されるものと仮定し、衝撃力について CRUSH コードを用いて計算した結果を表 4. 2-3 に示す。SAR において、

解析で得られた衝撃加速度に余裕を持たせた設計加速度 G_D を設定し、キャスクの安全機能の評価を実施している。設計加速度の大きさに対応する力の大きさが設計荷重である。加速度と衝撃力は以下の式の関係である。

$$G = \frac{F}{m}$$

ここで、

G : キャスクに作用する加速度 (m/s^2)

F : 衝撃力 (N)

m : 輸送物重量 (kg)

□ 内の数値は評価中のため参考値

表 4. 2-3 自由落下試験時の衝撃加速度

落下姿勢	衝撃力 $F(N)^{※9}$	衝撃加速度 $G_A(m/s^2)^{※9}$	設計加速度 $G_D(m/s^2)^{※9}$	設計荷重 (MN)
水平落下	2.22×10^7	169	196	25.8

※9 核燃料輸送物設計承認申請書 (SAR) (ロ)-第 A.18 表と同じ

4.3 キャスクに発生する慣性力 (加速度) について

竜巻荷重がキャスクに作用して加速度が生じた場合、キャスクの安全機能を構成する部位 (表 4. 1 参照) には加速度による慣性力が作用する。この時の慣性力は、加速度の大きさに依存するため、キャスクに作用する加速度が、外運搬規則の技術上の要件である 0.3 m 落下時の評価の設計条件として用いる設計加速度よりも小さく、キャスクに設計加速度が作用してもキャスクの安全機能を構成する評価部位が損なわれないことを確認する。また、閉じ込め機能の維持の観点から、衝突荷重による慣性力によって一次蓋の横ずれが生じないことを確認する。

a. 評価方法

加速度の算出には、キャスクの質量及び竜巻荷重から、以下のように求める。竜巻荷重については、表 4. 2-1 の中で、最も衝突荷重の大きいコンテナの値を用いる。

$$G = \frac{Q}{m} \quad (5)$$

ここで、

G : キャスクに作用する加速度 (m/s^2)

Q : 竜巻荷重 (N)

(= 5.74×10^6 (N) : 竜巻による荷重を考慮したコンテナの衝突荷重)

m : キャスクの質量 (kg)

(= 1.183×10^5 (kg) : 設計値)

式(5)によって算出した加速度による慣性力が一次蓋に作用し、一次蓋とフランジとの接触

面には、一次蓋のフランジへの押し付け力によって慣性力と反対方向に摩擦力が作用する。一次蓋に作用する慣性力は、一次蓋の質量及び加速度から、以下のように求める。

$$F=MG \quad (6)$$

ここで、

F : 一次蓋に作用する慣性力 (N)

M : 一次蓋の質量 (kg)

また、一次蓋とフランジの間に作用する摩擦力の算出には、以下の式を用いる。

$$f=F_L\mu \quad (7)$$

ここで、

f : 一次蓋とフランジの間に作用する摩擦力 (N)

F_L : 一次蓋のフランジ部への押し付け力 (N)

$$F_L=F_B \times n$$

F_B : 一次蓋ボルトの初期締め付け力 (N)

n : ボルト本数 (-)

μ : 一次蓋とフランジの間の摩擦係数 (-)

b. 許容基準

表4. 1で示した安全機能に影響する部位について、竜巻荷重により発生する加速度が、一般の試験条件の加速度よりも小さいことを確認することで、評価部位の安全機能が損なわれないことを確認する。なお、伝熱フィンについては、水平落下において外筒の構造健全性が維持されれば、伝熱フィンへの影響はないことから、外筒の評価で代表する。また、バスケットについては、塑性変形が生じる場合は変形状態を臨界解析で考慮することとしている。一次蓋の横ずれについては、慣性力に対して摩擦力が大きいことで、横ずれが発生しないことを確認する。

c. 評価結果

竜巻荷重により発生する加速度を表4. 3-1に示す。竜巻荷重によりキャスクに発生する加速度は、一般の試験条件の加速度よりも小さいことから、バスケット以外の評価部位はおおむね弾性範囲に留まり、また、バスケットについても、応力強さが設計降伏点よりも小さいため、塑性変形は生じない。

以上より、安全機能に影響する部位は、許容基準を満足しており、安全機能が損なわれるおそれはない。

□ 内の数値は評価中のため参考値

表 4. 3-1 竜巻荷重の加速度の評価結果

評価条件		評価結果	許容基準
竜巻荷重(MN)	貯蔵時の質量(t)	加速度(m/s ²)	設計加速度 ^{*1} (m/s ²)
5.74	118.3	49	196

※1 一般の試験条件の 0.3 m 水平落下と垂直落下時の加速度のうち、小さい値を選択。

一次蓋に作用する慣性力を表 4. 3-2 に、摩擦力を表 4. 3-3 に示す。一次蓋とフランジとの間に作用する摩擦力 $1.95 \times 10^6 \text{ N}$ は、一次蓋に作用する慣性力 $1.82 \times 10^5 \text{ N}$ より大きく、一次蓋の横ずれは発生しない。

表 4. 3-2 一次蓋に作用する慣性力

評価条件		評価結果
一次蓋の質量(kg)	加速度(m/s ²)	慣性力(N)
3700	49	1.82×10^5

表 4. 3-3 摩擦力

評価条件			評価結果
一次蓋ボルトの初期締付力(N)	ボルト本数 (-)	摩擦係数 (-)	摩擦力 (N)
2.9×10^5	48	0.14 ^{*1}	1.95×10^6

※1 炭素鋼と炭素鋼の接触部の摩擦係数を使用。JNES の金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書^{*2}^{*3} では、キャスクの落下試験の事後解析結果がまとめられている。蓋部の現実的なモデル化には、摩擦係数を設定する必要があるが、炭素鋼と炭素鋼の接触部の摩擦係数を 0.14 と設定することで、蓋部の挙動を再現できる旨、金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書に記載されていることから、キャスクの炭素鋼同士の接触部の摩擦係数は 0.14 を使用している。

※2 (一財)原子力発電技術機構, 「平成 14 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書」(平成 15 年 3 月)

※3 (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書」(平成 16 年 6 月)

5 キャスクの損傷評価

5.1 評価部位

キャスクの安全機能維持に係る部材かつ、竜巻飛来物が直接衝突する部位について、竜巻荷重が作用したとしても安全機能が損なわれないことを確認する。評価部位を表 5. 1 に示

す。

a. フランジ部

フランジ部は、密封境界を構成する部位であり、主要なガンマ線遮蔽体の一つである。遮蔽機能及び閉じ込め機能に必要な部位であるため、フランジ部がおおむね弾性状態に留まる範囲で耐えることを確認する。許容基準には、一般の試験条件（0.3 m 水平落下時）の設計加速度及び設計荷重を用いる。

荷重の作用範囲を図5. 1 (a) に示す。フランジ部の許容基準は、0.3 m 水平落下時の評価で用いる設計荷重（輸送用緩衝体からの反力）及びフランジ部に設計荷重が作用した時の応力とする。荷重については、式(3)、(4)を用いて算出した設計飛来物による衝突荷重と設計荷重を比較する。また、応力については設計荷重（輸送用緩衝体からの反力）とその作用範囲から算出した応力と設計飛来物による衝突荷重と衝突を想定したフランジ部の寸法を考慮した上で、設計飛来物の衝突面積から算出した応力を比較する。さらに、設計飛来物のうち、最も衝突荷重の大きいコンテナの値に、竜巻による荷重を考慮しても許容基準を満足することを確認する。

b. 二次蓋

二次蓋は、主要なガンマ線遮蔽体の一つであり、圧力監視境界を構成する。遮蔽機能及び閉じ込め機能に必要な部位であり、破断した場合、遮蔽機能に影響を及ぼすため、飛来物の衝突による二次蓋の破断の有無を評価する。評価にあたっては、鋼板の貫通限界厚さの評価式である BRL(Ballistic Research Laboratory)式(8)を使用し、貫通限界厚さと二次蓋の厚さを比較する。荷重の作用範囲を図5. 1 (b) に示す。

c. 外筒

外筒は、閉じ込め機能を構成する部材ではないが、その内側に中性子吸収材及び伝熱フィンを支持する構造であることから、遮蔽機能と除熱機能を維持する部位である。外筒は、破断した場合遮蔽機能と除熱機能に影響を及ぼすため、飛来物の衝突による外筒の破断の有無をb. 項と同様に確認する。荷重の作用範囲を図5. 1 (c) に示す。

表 5. 1 評価部位について

評価部位 ^{※1}	主要な安全機能	安全機能の内容	許容基準
フランジ部	遮蔽機能 閉じ込め機能	<ul style="list-style-type: none"> ・密封境界を構成する部位である。 ・主要なガンマ線遮蔽体の一つである。 	フランジ部がおおむね弾性範囲に留まること ^{※2} 。
二次蓋	遮蔽機能	<ul style="list-style-type: none"> ・主要なガンマ線遮蔽体の一つである。 	破断しないこと ^{※3} 。
外筒	遮蔽機能 除熱機能	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子遮蔽材であるレジンを保持する部位であり、かつ、伝熱部材である伝熱フィンが取り付けられる部位である。 	同上 ^{※3} 。

※1 一次蓋，一次蓋ボルト及びバスケットについては，竜巻荷重が直接作用することはないため，安全機能が損なわれることはない。

※2 外運搬規則の技術上の要件である 0.3 m 水平落下時にキャスクに生じる荷重及び応力以下であれば，密封境界を構成する部位はおおむね弾性範囲に留まり，キャスクの閉じ込め機能，遮蔽機能が損なわれることはない。

※3 想定される設計飛来物が二次蓋と外筒に衝突しても，二次蓋と外筒が十分な厚さを有していれば，二次蓋と外筒が破断することはない，キャスクの遮蔽機能，除熱機能が損なわれることはない。

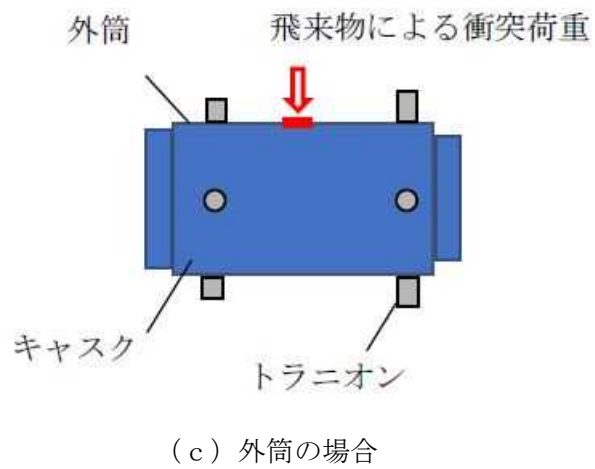
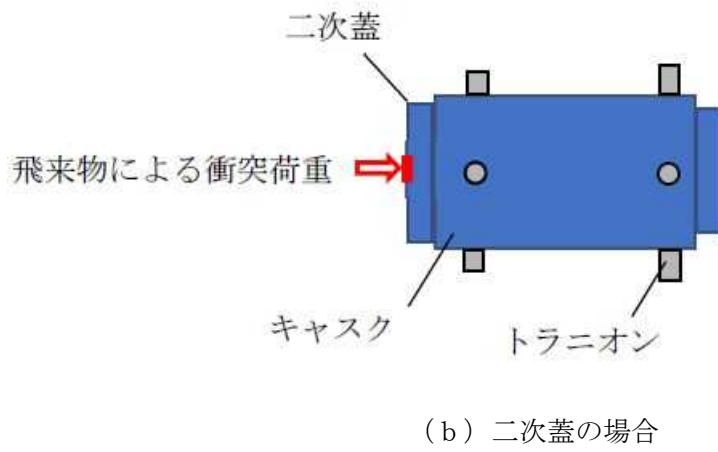
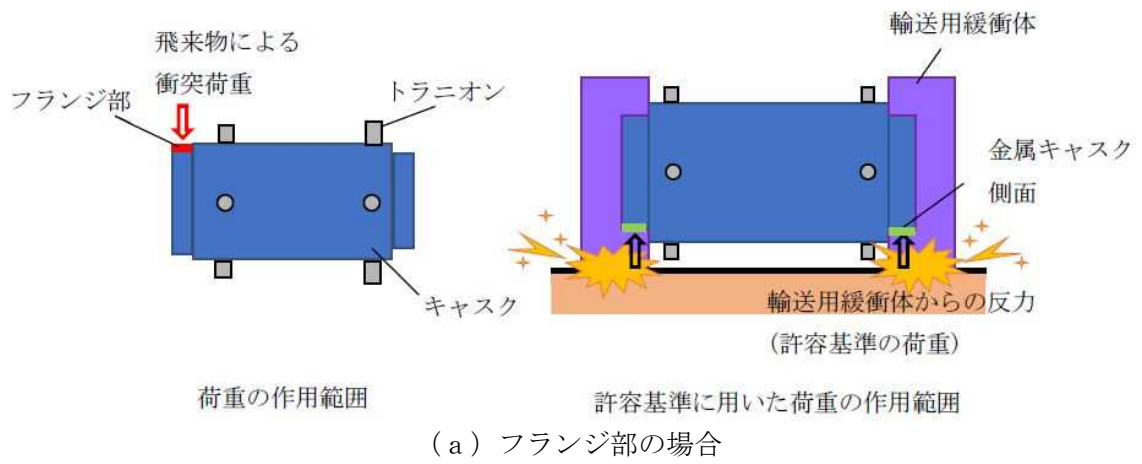


図5.1 荷重の作用範囲と評価部位

5.2 フランジ部の評価

竜巻荷重作用時において、フランジに発生する応力評価を行った。計算条件を表5. 2-1に示す。飛来物の衝突方向は、飛来物を表3. 2の寸法を有する直方体または円柱とした場合に、想定される複数の衝突の方向のうち、最も衝突荷重が大きくなる方向とした。各飛来物とキャスクの位置関係を図5. 2-1に示す。また、9m 水平落下時における上部緩衝体反力の作用範囲を図5. 2-2に示し、図5. 2-3に飛来物の衝突面積 S の設定に関する考え方を示す。図5. 2-1 (b)(c)(d)(e)のようにフランジ部の図5. 2-2の範囲に収まらないサイズの飛来物については、評価が保守的となるよう、図5. 2-2の範囲内に衝突荷重がかかるとして評価した。

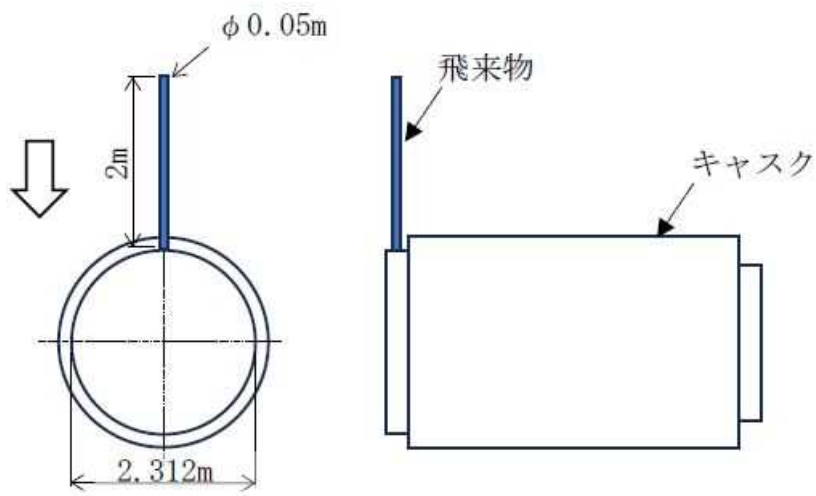
衝突荷重は、4.2 項で示した **Riera** の式を用いて算出する。**Riera** の式は飛来物が被衝突物との衝突後、完全に潰れきるまでの衝撃力を算出する計算式である。図5. 2-1 (c)(d)(e)に示したように、飛来物の図心がフランジ部より大きく離れているケースについては、フランジとの衝突直後に回転挙動を示し、回転落下すると考えられることから、飛来物が完全に潰れきることは考えにくい。このため、**Riera** の式を用いた衝突荷重評価は保守的な評価であると言える。飛来物の速度は表3. 2で示された最大水平速度と最大鉛直速度のうち、大きい方の値を選択した。

計算結果を表5. 2-2に示す。設計飛来物による衝突荷重及び応力は、竜巻による荷重を考慮しても、許容基準を下回り、フランジ部はおおむね弾性状態に留まる。したがって、竜巻荷重が作用した場合でも、キャスクの遮蔽機能及び閉じ込め機能が損なわれることはない。

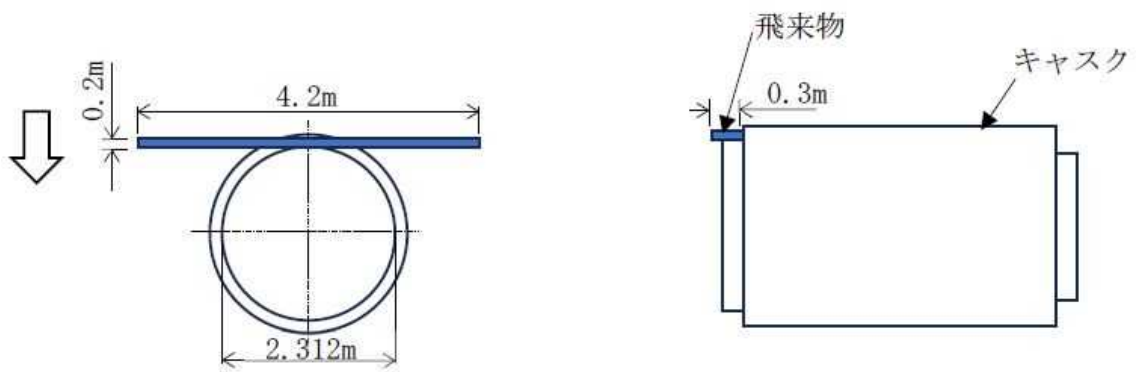
□ 内の数値は評価中のため参考値

表5. 2-1 飛来物の衝突荷重の計算条件

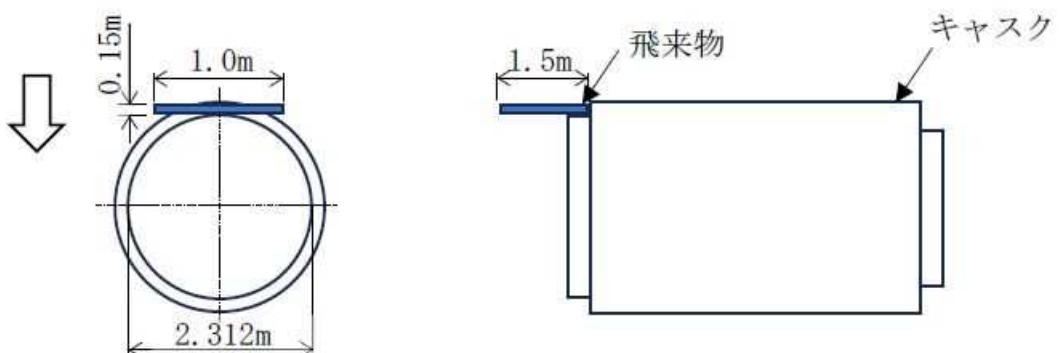
飛来物の種類	質量 m (kg)	長さ L (m)	速度 v (m/s)	飛来物の衝突面積 S (m ²)
鋼製パイプ	8.4	2	0	0.002
鋼製材	135	0.2	15.0	0.78
コンクリート板	540	0.15	0	0.23
コンテナ	2300	2.4	54.4	0.78
トラック	4750	1.3	6.24	0.78
※キャスク仮保管設備周辺の飛来物を追加予定				



(a) 鋼製パイプとの衝突

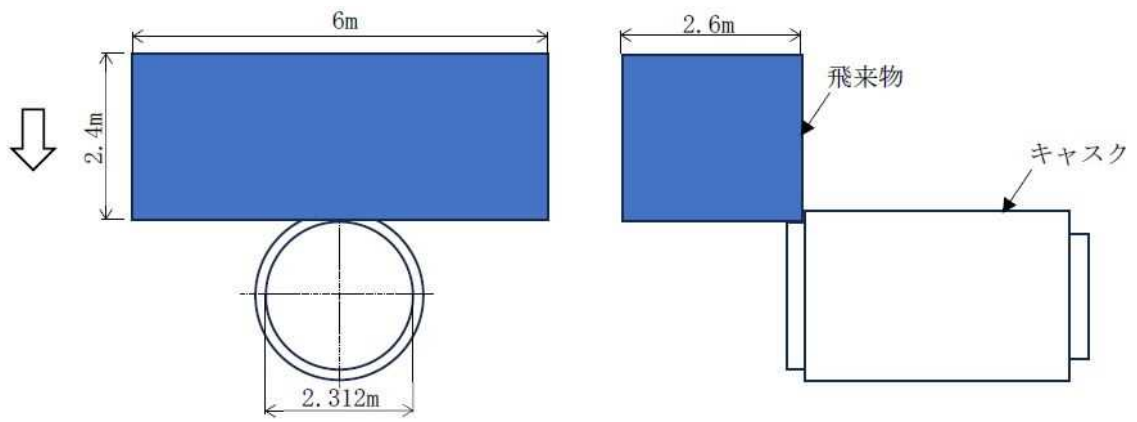


(b) 鋼製材との衝突

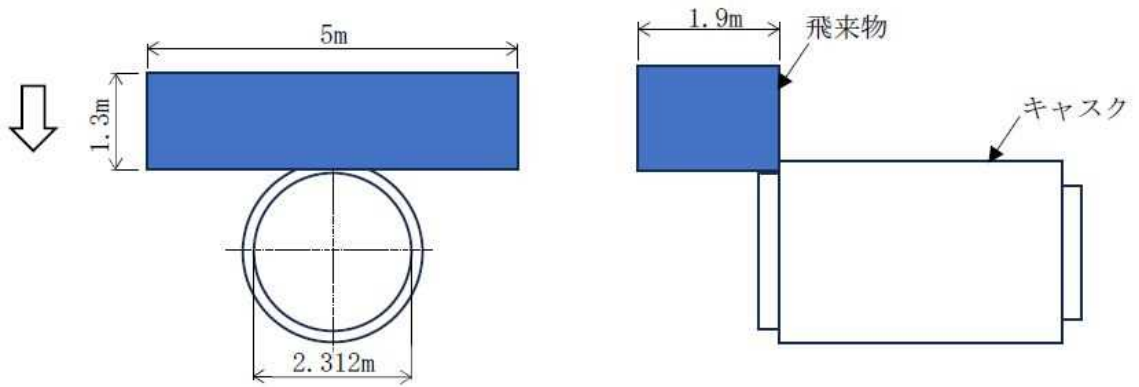


(c) コンクリート板との衝突

図5. 2-1 各飛来物の衝突姿勢 (1/2)



(d) コンテナとの衝突



(e) トラック

図5. 2-1 各飛来物の衝突姿勢 (2/2)

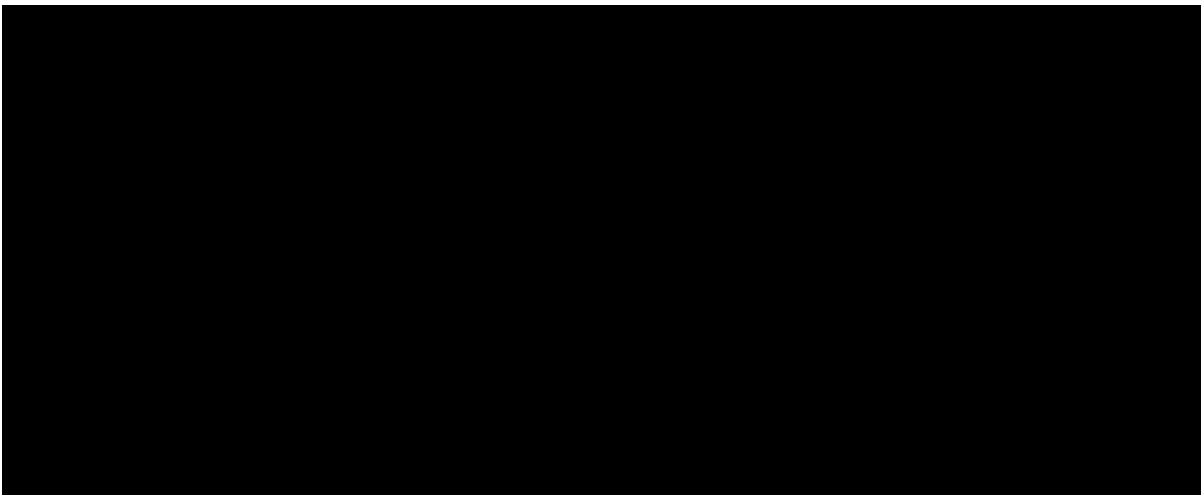
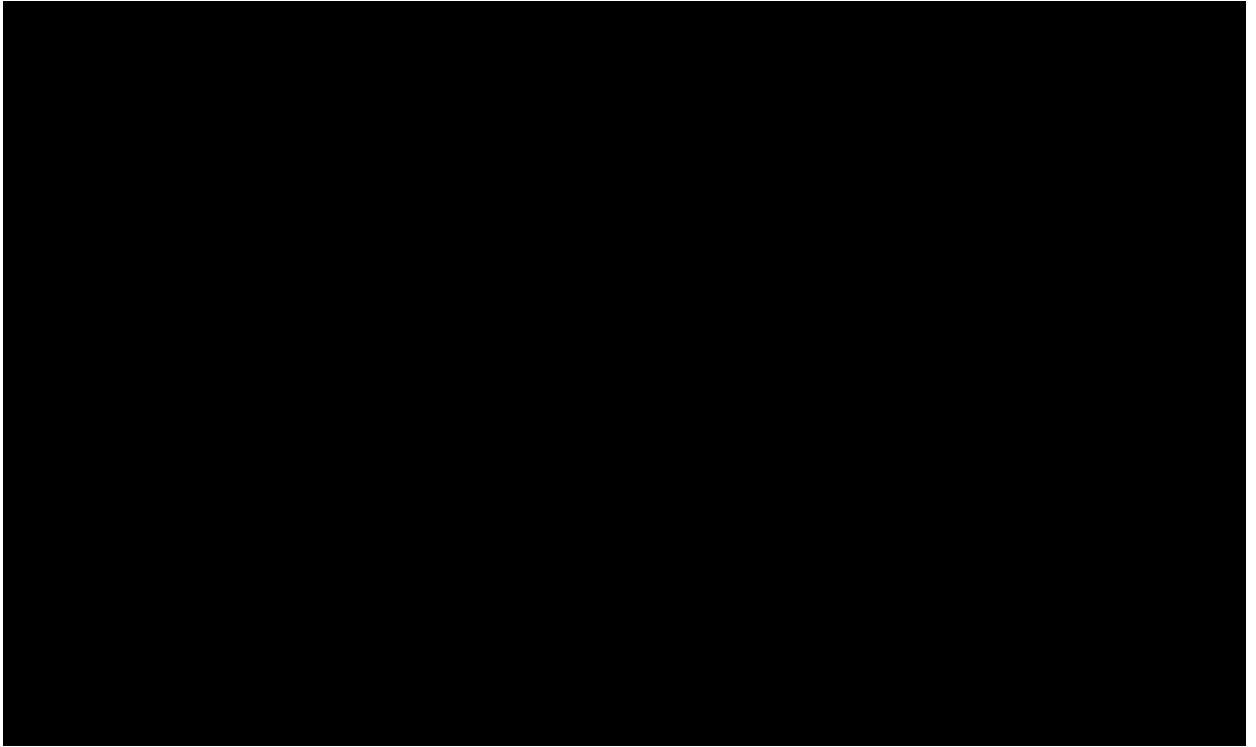
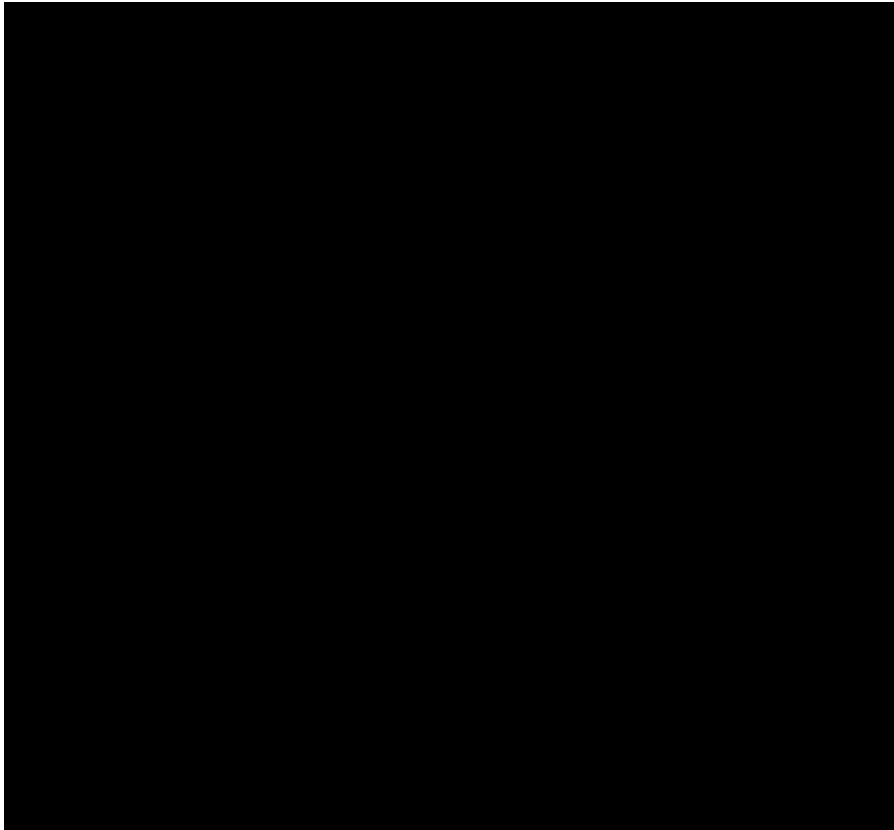


図5. 2-2 9m 水平落下時における上部緩衝体反力の作用範囲



(a) 飛来物：鋼製材の場合



(b) 飛来物：コンクリート板の場合

図5. 2-3 飛来物の衝突面積について

□ 内の数値は評価中のため参考値

表5. 2-2 飛来物の衝突荷重および応力の計算結果

飛来物の種類	評価結果		許容基準		備考
	衝突荷重 ^{※1} P(MN)	応力 ^{※2} (MPa)	作用する 荷重(MN)	応力 (MPa)	
鋼製パイプ	0.00	0.00	25.8 ^{※1}	18 ^{※3}	おおむね弾性 範囲に留まる ことを確認
鋼製材	0.15	0.19			
コンクリート板	0.00	0.00			
コンテナ	5.66	7.26			
コンテナ (竜巻による荷重を考慮)	5.74	7.36			
トラック	0.28	0.36			
※キャスク仮保管設備周 辺の飛来物を追加予定					

※1 表4. 2-1と同じ値

※2 評価部位に設計飛来物の衝突荷重が作用した時の応力

※3 0.3 m 水平落下時のキャスクに作用する荷重

設計荷重 25.8MN を 9m 水平落下時の緩衝体反力作用範囲面積で割ることで算出。作用範囲面積は保守的に許容基準応力の小さくなる、面積の広い 9m 水平落下時の面積を用いる。以下の式を用いて求める。

$$\text{応力(MPa)} = \text{作用する荷重(MN)} / \text{面積(mm}^2\text{)}$$

5.3 二次蓋，外筒の貫通評価

鋼板の限界貫通厚さに関する評価式である BRL 式として，以下の式を用いて，限界貫通厚さを求め，二次蓋および外筒の厚さと比較する。限界貫通厚さ評価の計算条件および計算結果を表5. 3に示す。限界貫通厚さは，最大 6.30 mm であり，二次蓋，外筒が破断することはない。したがって，キャスクの遮蔽機能及び除熱機能が損なわれることはない。

$$t^{3/2} = \frac{0.5 \times m \times v^2}{1.4396 \times 10^9 \times K^2 \times d^{3/2}} \quad (8)$$

ここで，

t : 鋼板の限界貫通厚さ(m)

m : 飛来物の重量(kg)

v : 飛来物の速度(m/s)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径(m)

(飛来物の投影面積が $S_2(m^2)$ の時, $S_2 = \pi \times d^2 / 4$)

K : 鋼板の等級に関わる係数(= 1.0)

□ 内の数値は評価中のため参考値

表 5. 3 二次蓋, 外筒の限界貫通厚さの計算条件及び計算結果

飛来物の種類	計算条件				限界貫通 厚さ (mm)	二次蓋 の厚さ (mm)	外筒 の厚さ (mm)
	質量*1 m (kg)	速度*1 v (m/s)	投影面積 $S_2(m^2)$	直径 d (m)			
鋼製パイプ	8.4	0	0.0025	0.050	0	134	20
鋼製材	135	15.0	0.06	0.277	1.74		
コンクリート板	540	0	0.15	0.438	0		
コンテナ	2300	54.4	6.24	2.819	6.30		
トラック	4750	6.24	2.47	1.774	0.91		
※キャスク仮保 管設備周辺の飛 来物を追加予定							

※1 表 5. 2-1 と同じ値

6 まとめ

竜巻ガイドを踏まえた設計飛来物に対するキャスク単体の構造における安全機能維持評価を実施した。設計飛来物がキャスクに衝突した際に発生する最大衝突荷重は 5.74 MN (飛来物: コンテナ (竜巻による荷重を考慮)) である。当該荷重がキャスクに作用した際に発生する慣性力 (加速度) を評価した結果, 外運搬規則の一般の試験条件 (0.3m 水平落下) の設計加速度を大幅に下回ることから, 安全機能は維持される。また, 飛来物と直接衝突するフランジ部, 二次蓋及び外筒は, 各飛来物が各部位に衝突した場合の損傷評価を行い, 判定基準を満足し, 安全機能が維持されることを確認した。

7 参考文献

- (1) 原子力規制委員会, 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」, 平成30年11月28日原規技発第1812177号.
- (2) 日本建築学会, 「建築物の耐衝撃設計の考え方」 (2015年1月).
- (3) Jorge D. Riera, “On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces”, Nuclear Engineering and Design 8, 415-426(1968).
- (4) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説(2015)」 (2019年10月)
- (5) (一財)電力中央研究所, 「竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案」 平成27年10月

以上

竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

1. 竜巻影響評価の風速場モデルについて

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下「竜巻ガイド）」を参照し竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル」及び原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析があるが、当社の竜巻影響評価においては、地面におかれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデル DBT-77 (DBT : Design Basis Tornado) を選定する。

2. フジタモデルの概要

フジタモデルは、米国 NRC の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録をもとに考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査、被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図をもとに作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ、及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場をよく表現している点にある。

3. ランキン渦モデルの概要

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度用のランキン渦モデルは竜巻中心に向かう半径方向風速と上昇速度を特別に付加している。そのため、流れの連続の式（質量保存式）を満たしておらず、地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

4. モデルの比較

それぞれの風速場モデルの特徴の比較を表 1 に示す。またフジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図 1 に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含め、より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ラン

キン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的良好に表現できていると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析するに適切でない。フジタモデルは特に問題となる点もないことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表1 フジタモデルとランキン渦モデルの特徴の比較

モデル	使用実績	特徴	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国DOE重要施設的设计基準作成に利用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している。 ・比較的簡易な代数式により風速場を表現できる。 ・流体の連続式を満たす定式化。 ・地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし。 (ランキン渦モデルと比較すると、解析モデルが複雑になるが、計算能力の向上、および評価ツールの高度化により問題とならない)
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている。 ・竜巻ガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する。(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離。 ・地上からの飛散挙動を改正するには適切でない。

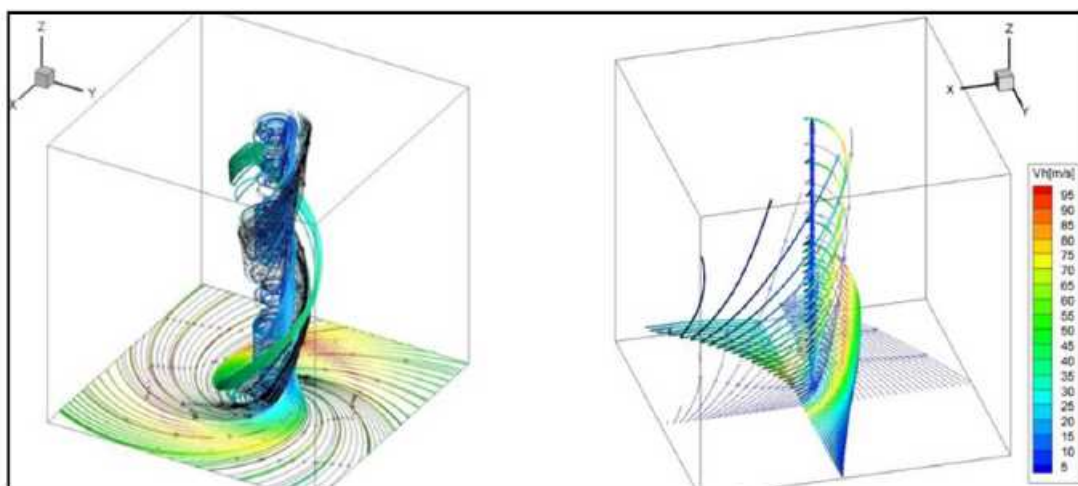


図1 フジタモデル(左)とランキン渦モデル(右)の風速場構造の比較

以上