

# 大洗研究開発センター廃棄物管理施設における 森林火災の及ぼす影響評価

Impact Assessment of the Forest Fires on Oarai Research and Development Center  
Waste Treatment Facility

下村 祐介 羽成 章 佐藤 勇 北村 了一

Yusuke SHIMOMURA, Akira HANARI, Isamu SATO and Ryoichi KITAMURA

バックエンド研究開発部門  
大洗研究開発センター  
環境保全部

Waste Management Department  
Oarai Research and Development Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

## 大洗研究開発センター廃棄物管理施設における 森林火災の及ぼす影響評価

日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門  
大洗研究開発センター 環境保全部

下村 祐介、羽成 章\*<sup>1</sup>、佐藤 勇\*<sup>2</sup>、北村 了一

(2015年12月24日 受理)

廃棄物管理施設を規制するための新しい基準（新規制基準；平成25年12月18日施行）を受けて、日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センターの廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響評価を行った。はじめに森林火災の延焼シナリオを想定し、現地調査、森林火災評価モデル等から、森林火災の強度を評価した。森林火災の強度の評価に用いたモデルは、Rothermelの拡大方程式及びCanadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) Systemである。輻射熱による施設への影響評価を行い、想定した森林火災に対する施設外壁の温度変化を試算した。施設外壁温度は最大160℃程度と評価され、一般にコンクリートの強度に影響がないとされている許容温度（200℃）には達しない事を明らかにした。さらに、防火帯突破確率を試算し、約20%程度であった。本報告書は、廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響評価を通して、新規制基準における森林火災に対する評価の一例を示すものである。

**Impact Assessment of the Forest Fires on Oarai Research and Development Center  
Waste Treatment Facility**

Yusuke SHIMOMURA, Akira HANARI<sup>\*1</sup>, Isamu SATO<sup>\*2</sup> and Ryoichi KITAMURA

Waste Management Department  
Oarai Research and Development Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 24, 2015)

In response to new standards for regulating waste treatment facility (“new regulatory standards” ; December 18, 2013 enforcement), it was carried out impact assessment of forest fires on the Waste Treatment Facility existed in Oarai Research and Development Center of Japan Atomic Energy Agency. At first, a fire spread scenario of forest fires was assumed. The intensity of forest fires was evaluated from field surveys, forest fire evaluation models and so on. As models of forest fire intensity evaluation, Rothermel Model and Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System were used. Impact assessment of radiant heat to the facility was carried out, and temperature change of outer walls for the assumed forest fires was estimated. The outer wall temperature of facility was estimated around 160 °C at the maximum, it was revealed that it doesn't reach allowable temperature limit. Consequently, it doesn't influence the strength of concrete. In addition, a probability of fire breach was estimated to be about 20 %. This report illustrates an example of evaluation of forest fires for the new regulatory standards through impact assessment of the forest fires on the Waste Treatment Facility.

Keywords: Forest Fires, New Regulatory Standards, Waste Treatment Facility, Rothermel Model, Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System

---

<sup>\*1</sup> Inspection Development Company Ltd.

<sup>\*2</sup> Tokyo Institute of Technology

## 目 次

1. 序論	1
2. 森林火災評価手順の概要	2
2.1 国内外における森林火災の発生状況	2
2.2 森林火災の種類と発生危険性に寄与する条件	2
2.3 森林火災の評価ガイド	4
2.4 森林火災の延焼評価手法	4
3. 想定した火災延焼シナリオ	6
3.1 火災延焼シナリオ	6
3.2 評価対象施設の検討	6
4. 評価に使用したモデル	7
4.1 Rothermel の拡大方程式	7
4.2 Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System	8
5. 森林火災の強度等の算出	9
5.1 入力条件	9
5.2 モデル別詳細な入力値	9
5.3 その他計算に係る検討事項	10
5.4 算出結果	11
6. 施設への輻射熱による影響評価	12
6.1 輻射熱が施設に到達する距離	12
6.2 施設に到達する火炎の幅（火炎到達幅）	12
6.3 火炎延焼距離	13
6.4 受熱点の輻射熱評価	13
7. 評価結果	15
7.1 施設外壁温度の評価結果	15
7.2 防火帯突破確率の評価結果	15
8. 結論	16
謝辞	16
参考文献	17
付録 1	41
付録 2	46

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Overview of forest fires evaluation procedure .....	2
2.1 Occurrence of forest fires in the home and abroad .....	2
2.2 Type of forest fires and conditions contributing to the occurrence risk .....	2
2.3 Evaluation guide of forest fires .....	4
2.4 Evaluation method of forest fires .....	4
3. The assumed fire spread scenario .....	6
3.1 Fire spread scenario .....	6
3.2 Inquest of evaluated facility .....	6
4. Using Model .....	7
4.1 Rothermel Model .....	7
4.2 Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System .....	8
5. Estimation of parameters on Forest Fires .....	9
5.1 Input condition .....	9
5.2 By Model detailed input values .....	9
5.3 Other considerations relating to the calculation .....	10
5.4 Estimation result .....	11
6. Impact assessment of the radiant heat to the facility .....	12
6.1 Distance radiant heat to reach facility .....	12
6.2 The flame width to reach facility .....	12
6.3 The flame spread distance .....	13
6.4 Radiant heat evaluation of the heat receiving point .....	13
7. Evaluation result .....	15
7.1 Evaluation result of outer wall temperature of facility .....	15
7.2 Evaluation result of fire breach probability .....	15
8. Conclusions .....	16
Acknowledgement .....	16
References .....	17
Appendix 1 .....	41
Appendix 2 .....	46

## 1. 序論

2011年の東日本大震災によって発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故の反省と国内外からの指摘を踏まえて、原子炉等の設計を審査するための新しい基準（以下「新規制基準」という。）が策定された。これまでの基準の問題点として、地震、津波等の大規模な自然災害の対策が不十分であり、また、重大事故によって生じる事象の対策が規制の対象となっていなかったため十分な対策がなされていなかったこと、新しく規制を策定しても既存の原子力施設に遡って適合することが要求されなかったこと等が挙げられ、新規制基準はこれらの問題点を配慮して策定された。これは、それに先立って制定された新規制基準の前提となる法（平成24年6月施行）に含まれる、人の安全に加え環境を守ることを目的に追加すること、シビアアクシデントを規制対象とすること、新規制を既設の原子力施設に遡って適用すること等に準拠する内容である。

廃棄物管理事業とは、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物について、埋設等による最終的な処分がなされるまでの間、放射線による障害の防止を目的とした管理、容器への封入、固型化による管理、最終的な処分に適した性状への処理を行う事業のことをいう<sup>2)</sup>。現在、日本国内で廃棄物管理事業を行っているのは、日本原子力研究開発機構及び日本原燃株式会社の2法人だけである。Table 1.1にこれらの廃棄物管理施設の操業状況を記す。

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センターにおける廃棄物管理施設（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第五条の二第二項第二号に定める施設をいう。）は、廃棄物管理設備及びその附属施設等で構成され、大洗研究開発センターの北部に位置し階段状に整地造成した台地に設置されている。廃棄物管理を行う放射性廃棄物は、大洗研究開発センター、東北大金属材料研究所及び日本核燃料開発（株）における原子炉の運転及び核燃料物質の使用に伴って発生し、その処理を行うために受け入れる液体廃棄物及び固体廃棄物並びにこれらを処理して容器に封入又は固型化したものである。平成4年3月に廃棄物管理の事業許可を取得し、改修工事、検査等を経て平成8年3月から事業を開始している。Fig.1.1に大洗研究開発センターにおける廃棄物管理施設の概要を示す。

廃棄物管理施設に係る新規制基準は平成25年12月18日に施行された。正式名称は「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」である。廃棄物管理施設の新規制基準では、従来の規制基準に対して上記の観点の他、廃棄物管理施設への不審人物の侵入等の防止、核燃料物質の臨界防止等が新たに追加されるとともに、自然現象に対する考慮として竜巻、火山、森林火災等が新設され、地震、津波等による損傷の防止が強化・明確化された。

本報告書では、大洗研究開発センターに所在する廃棄物管理施設の新規制基準への適合を評価するために行った様々な検討・対策のうち、廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響についての評価結果を示すものである。

## 2. 森林火災評価手順の概要

### 2.1 国内外における森林火災の発生状況

森林火災は、乾燥した季節には世界中何処でも発生するが、その中でも欧州地中海沿岸地方、北米、ロシア等では近年大規模な森林火災の発生により、多大な被害と多数の被災者が発生している。

これらの森林火災の発生状況については、データの取得されていない国を除き、UNECE（国連欧州経済委員会）レポート「FOREST FIRE STATISTICS 1999-2001」<sup>3)</sup>や ECJRC（欧州委員会共同研究センター）レポート「Forest Fires in Europe」<sup>4)</sup>等で報告されている。これらのレポートを基に、欧州地中海沿岸地方、北米、ロシア及び日本において近年発生した森林火災面積と発生件数を Fig.2.1 に示す。Fig.2.1 において、アメリカ、ロシア及びカナダでの火災面積は 100 万 ha 以上であり、次に火災の多い地中海諸国では 10 万 ha 前後、また日本ではさらに 2 桁少ない数千 ha である。日本は年間を通して比較的高温多湿であることなどの気象条件により、他国に比べて森林火災が少ないものと考えられる。

森林火災の発生原因としては、落雷、火山、枯葉同士の摩擦等の自然発生的要因によるものと人為的要因によるものがある。前者については、国外の異常乾燥が起こる地域においてしばしばみられるが、日本においては自然発生的なものは滅多になく、大半が人為的要因である。Fig.2.2 に日本における森林火災の発生原因を示す。発生した森林火災のうち原因が明らかなものについてみると、たき火が 28.1% で最も多く、次いで火入れ 16.8%、放火（放火の疑いを含む。） 11.2%、たばこ 6.8% の順となっている。

### 2.2 森林火災の種類と発生危険性に寄与する条件

#### (1) 森林火災の種類

森林火災は燃焼する部位によって、地表火、樹冠火、樹幹火及び地中火に分類される。以下に、火災便覧第 3 版<sup>7)</sup>を基にそれら種類について概説する。

##### A. 地表火

森林火災の中でも最も多く発生する火災で、林地や原野を覆っている枯れた雑草、低木、落葉枝等が燃えるものである。地表の可燃物が多い場合には地表火から樹冠火や樹幹火に発展し、林木の焼損を大きくしている。特に、ススキやシダ類の枯草は、非常に燃えやすく、火勢も強いので危険である。

##### B. 樹冠火

木の樹冠（枝葉）が燃える火災である。大部分は地表火から誘発されるもので、単独に樹冠から発火することは少ない。一般に油脂分の多い、スギ、ヒノキ、アカマツ等の針葉樹が燃えやすく危険である。樹冠に一旦火が入ると可燃物質の量が多いため、火勢が非常に強くなり、消火は大変困難となる。

##### C. 樹幹火

木の幹が燃える火災でこれも地表火からの燃え上がりによるものがほとんどである。老樹の針葉樹のような樹皮が粗いものや、エゾマツ及びトドマツのように樹脂の滲み出ているもの、



枯木や空洞化した大木などが樹幹火を起こしやすい。

#### D. 地中火

地中にある泥炭層、亜炭層その他の有機質層が燃えるものである。容易に鎮火しないが、空気の供給が制約されているため、燃焼速度は1時間に4~5m程度である。ボルネオ島東側にあるインドネシアの東カリマンタン州のように泥炭層や亜炭層を多く含む地質が広がっている地域、寒冷で落葉枝葉が分解しにくい亜高地帯や高緯度地方に発生しやすく、日本では北海道に多くまれに中部山岳地域に発生することがある。

### (2) 森林火災の発生危険性に寄与する条件

森林火災の規模や延焼速度等の発生状況は、降水、湿度、風、気温、傾斜方位、傾斜度、土壌、樹齢等多くの要因により異なってくる。これをまとめると、気象条件・地理条件・植生条件の3つの条件が発生危険性に大きく寄与している。ここでは、森林火災の発生危険性に寄与する3条件について、火災便覧第3版<sup>7)</sup>を基に詳述する。

#### A. 気象条件

降水、湿度、気温、日射量、風等の気象条件は森林火災の危険性に特に関係が深いと考えられている。

降水は、森林火災の危険性を弱める要素を持っている。雨中には可燃物に湿りを与えるためほとんど火災は発生せず、さらに火災発生中に降雨があると多くが鎮火するといわれている。よって、降雨は、発生危険性を低めると同時に延焼拡大の危険性を弱める機能があり、逆に何日も晴日が続くときには、大規模な火災の発生危険性が高まる。平成3年3月7日に日立市で発生した森林火災は、山林約218haを焼失させたばかりか隣接する住宅23棟を全半焼させる大規模な火災であったが、当時の日立市の気象状況をみると、火災当日まで16日間全く雨なしの乾燥注意報が出されていたという異常乾燥が続く状況であった。

湿度は、可燃物の乾燥度に影響を与え、湿度が高いと燃えにくくなり、逆に湿度が低いと燃えやすくなる。林野においては、特に落葉、枝葉等の林床の可燃物に影響を与えることが考えられ、日本の森林火災（林野火災）の多くが林床の可燃物が延焼する地表火であることを考慮すると火災の危険性を判断する重要な要因となる。

気温は、可燃物の乾燥度に影響するが、それだけで森林火災の危険度を判断するのは難しい。ただし、湿度が一定の場合には、温度が高いほど延焼速度が増大するとの見方もある。

日射量も気温と同様に森林火災の危険性に間接的に影響する。日中で火災の危険性の高い時刻は、午前11時から午後3時頃までと考えられているが、これはこの時刻の日射により気温上昇が高くなり、それにより可燃物の乾燥が進むためである。

風は、延焼速度の増大、飛び火の拡大、可燃物の乾燥促進、延焼方向等に影響を与え、燃焼に直接的に影響する。一般的に風速が大きくなると延焼速度が増し、危険性も増大する。

#### B. 地形条件

地形条件は、森林火災の危険性に影響をもたらす。直接的には、斜面方向、傾斜度等の要因により危険性は左右され、間接的には、地形の変化により局地的な気象条件や植生条件に影響を与えることによる。直接的な要因である傾斜方向については、南斜面（南西～南～南東）が

発生危険性が高いとされている。これは、南斜面が他の方位と比べ日射量が多く乾燥しやすいためである。傾斜度は主に延焼速度に対して影響を及ぼす。上り斜面に対して延焼する場合、傾斜度が大きくなると立ち上がった火炎は斜面方向になびくように近づく。これにより火炎と未燃可燃物の距離が短くなり、火炎からの伝熱量が増大し未燃可燃物への着火が促進され、延焼速度の増大につながる<sup>8)</sup>。

### C. 植生条件

森林火災の危険性は、森林を構成する樹種、樹齢等の植生条件で異なる。一般的には、常緑樹は耐火力の大きいものが多く、針葉樹は枝葉に樹脂を多く含み、延焼の危険性が高いとされる。また、樹種構成が同一であっても、樹齢によっても危険性が異なる。最も危険性が高いのは、樹齢 20 年以下の幼齢林である。これは、苗木の隙間に下草類が繁茂し、地表火の危険性が高くなるためである。一方で、樹齢 20～60 年の壮齢林では、樹冠が密になり、林床に日射が届きにくくなることで下草類の生育が抑えられるうえ、林床が湿潤に保たれるため、森林火災に対して最も安全な状態となる。それ以上の老齢林になると、樹冠が密とはならず、下草が繁殖し始め、地表火の危険性が再び増大することとなる。

以上のように、森林火災は上記の様々な条件によって危険性が変化する。森林火災の各延焼速度予測モデルはこれらの条件を直接的又は間接的な入力値として設定し、森林火災における延焼速度や火炎の強度等を算出している。本報告書で用いたモデルは「4. 評価に使用したモデル」で詳述する。

## 2.3 森林火災の評価ガイド

原子力発電所に対する森林火災の影響評価について、原子力規制委員会が「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」(以下「評価ガイド」という。)<sup>9)</sup>を発行している。

この評価ガイド<sup>9)</sup>は、発電所敷地外で発生する火災が原子炉施設(安全機能を有する構築物、系統及び機器を内包するものに限る。)へ影響を与えないこと及び発電所敷地外で発生する火災の二次的影響に対する適切な防護対策が施されていることについて評価するための手順の一例を示すものである。考慮すべき発電所敷地外の火災は、①森林火災、②近隣の産業施設の火災・爆発、③航空機墜落による火災を対象としている。

評価ガイド<sup>9)</sup>は、実用発電用軽水炉型原子炉施設を対象としたものであるが、本報告書においても、必要に応じて評価ガイド<sup>9)</sup>を参考にしながら、廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響評価を行った。

## 2.4 森林火災の延焼評価手法

森林火災の延焼評価手法は、先駆的にアメリカ、オーストラリア、カナダ等で整備が進んでいる。ここでは、各国の評価手法として、FARSITE、McArthur の手法、Alexander and Fogarty の手法及び Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System (以下「FBP System」という。)について紹介する。

### (1) FARSITE

FIRSITE<sup>10)</sup>は、米国農務省 (USDA Forest Service) が開発した森林火災予測モデルである。FIRSITE は、地理データ、燃料データ及び天候データを詳細に設定することにより、森林火災の成長と挙動をシミュレートする事ができる。FIRSITE を実行するために、入力情報として地理情報システム (GIS : Geographic Information System) から空間的な地理情報 (地表燃料、樹冠率、樹高、樹冠高さ、樹冠かさ密度、スロープ等) が必要である。それに対して出力情報として、火災外周長さ、位置、延焼速度、火線強度及び面積あたりの熱量が与えられる。FARSITE の特長として、火災の 4 つの挙動タイプ (地表火、樹冠火、飛び火及び炎加速) を考慮するとともに、地理空間情報を入力データとして使用する事により、現地の状況に即した評価を行う事が可能である。FIRSITE の使用例については、福島第一原子力発電所の周辺地域を対象とした詳細な評価が旧原子力安全基盤機構によって行われている<sup>11)</sup>。

## (2) McArthur の手法

McArthur<sup>12), 13)</sup>の手法は、草の枯れ具合、温度、相対湿度、風速及び燃料重量を入力する事により、火災危険度インデックス、延焼速度及び燃料の含水率が出力される。この値から読み取り表を用いて、時間経過における燃焼エリアの面積、火災高さ等を概算する構成となっている。30 年以上にわたりオーストラリアの農村地帯で活用されているこの手法は、燃料として初夏の南オーストラリアの標準的な牧草地 (燃料割合 : 4t/ha) を設定しており、読み取れる結果は入力条件下での最悪の結果が示される<sup>13)</sup>。なお、McArthur の手法の評価例については、Appendix 1 に記載する。

## (3) Alexander and Fogarty の手法

Alexander and Fogarty<sup>14)</sup>の手法は、風速を設定することにより、延焼速度、火線強度、火災長、火災エリアの周長、火災エリアの最大幅及び防火帯の最小幅を簡易的に評価する手法である。カナダとニュージーランドの牧草地における火災に対して、消防士の携帯用カードとして利用されている。この手法は、燃料の種類に次項 (4) に示す評価モデルの **standing grass fuel type (O-1b)** を使用しており、燃料重量は 3.5t/ha、燃料の枯れ具合は 100% (草木等の枯れ具合を 1~100% で表現する。100% は完全に枯れている状態を表す。)、地形の傾斜は 0° を条件とし、最悪のケースに近い評価結果が示される。なお、Alexander and Fogarty の手法の評価例については、Appendix 1 に記載する。

## (4) Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System

FBP System<sup>15)</sup>はカナダの森林火災危険度評価システム (CFFDRS) のサブシステムであり、Fire Danger Group によって開発された。システムの構造として入力情報は、火災の挙動に影響を及ぼす主要な 3 つの要素 (植生、気象及び地形) から構成される。その他の入力情報としては、緯度/経度、季節及び発火からの経過時間等がある。一方、出力情報は、火災挙動の構成要素として延焼速度、燃料消費量、前面の火線強度及び火災形態 (地表火か樹冠火)、その他に前面の延焼距離、楕円形の延焼範囲と境界 (外周)、側面・後方の延焼速度及び火線強度である。FBP System の詳細については、「4. 評価に使用したモデル」で述べる。

### 3. 想定した火災延焼シナリオ

#### 3.1 火災延焼シナリオ

火災延焼シナリオを想定するにあたり、はじめに発火点を設定する。評価ガイド<sup>9)</sup>では、発電所敷地外の 10km 以内に発火点を設定するとしている。Fig.3.1 に示す通り、廃棄物管理施設から半径 10km 圏内には、東に太平洋、北に涸沼川、北西に涸沼があり、南から西の方角は耕地となっている。また、廃棄物管理施設周辺には、国有林等の広大な森林は存在しないため、燃焼が幾日にも及ぶ大規模な森林火災は発生しないと考えられる。そのため、10km 以内で廃棄物管理施設から遠方の位置に発火点を設定したとしても、その火災が森林等を介して延焼し廃棄物管理施設に到達する事は考えにくい。また、評価対象施設に近接して発火点を設定した方が、施設に到達する時間が短くなりより厳しい設定（安全側の設定）となる。よって、大洗研究開発センターの近辺に発火点を設定する。

Fig.3.2 に廃棄物管理施設周辺の上空写真<sup>16)</sup>を示す。大洗研究開発センターの敷地外には、①海岸沿い、②ゴルフ場東側、③廃棄物管理施設西側に小さな林が存在する。大洗研究開発センターの外周には、道路（6~25m 幅相当）があるため、大洗研究開発センター外で発生した火災は敷地内の林へ延焼しにくい。そこで、これらの林の火災により発生した飛び火が施設内の林（落ち葉）へ延焼すると想定し、その可能性が最も高い場所を発火点として設定した。①海岸沿いの林については、敷地内の林との間に幅 25m の国道があるため、敷地内へ延焼する可能性は低い。②ゴルフ場東側の林については、隣接する敷地内の林が構内道路により分断されているため、火災が他の林に延焼する可能性は低い。一方で、③廃棄物管理施設西側の林については、施設内の林と接しており延焼する可能性も①及び②と比べて高い。さらに、廃棄物管理施設への到達時間も最も短い事から、より安全側を考慮して、③の林を発火点として設定した。

上記の発火点に対して想定した火災延焼シナリオは以下の通りである。

- a) 大洗研究開発センター外で発生した火災が飛び火し、③付近の敷地内の落ち葉へ延焼する。
- b) 燃焼する落ち葉が立木に燃え広がる。
- c) 延焼が廃棄物管理施設に隣接する落ち葉及び立木にまで広がる。なお、廃棄物管理施設の周辺には防火帯相当のエリア（7.5m）がある。
- d) 火災は廃棄物管理施設の周辺に到達後、横方向へ延焼する。

#### 3.2 評価対象施設の検討

廃棄物管理施設には 20 弱の施設があるが、今回の森林火災の想定では、これら施設の中で最も条件が厳しくなる施設（施設と林の離隔距離が最も短く、延焼面積が最も大きい林に接している条件）を選定する。Fig.3.3 に廃棄物管理施設の上空写真<sup>16)</sup>を示す。廃棄物管理施設に隣接する林Ⅰ～林Ⅳのうち最も大きい林は林Ⅰである。またこの林は、「3.1 火災延焼シナリオ」において設定した発火点（林③）に対して最も近く延焼する可能性が高い。そして、この林と隣接する施設の中で離隔距離が最も短いのは固体集積保管場Ⅱの 7.5m（A 地点）であるため、この施設を評価対象施設とした。

#### 4. 評価に使用したモデル

本報告書においては、「2.4 森林火災の延焼評価手法」のうち、施設への影響評価を行う際に必要となるパラメータ（延焼速度、火線強度等）が得られる **FBP System** を用いた。ただし、本システムの問題点として、日本での評価例が非常に限られること、システム内で独自のパラメータを使用していること等から、出力された結果の検証と妥当性確認が容易で無いことがある。そこで、本システムで算出される結果の妥当性を確認する意図を踏まえて、**FBP System** に、これまで日本での評価例<sup>8), 17)</sup>がある「**Rothermel** の拡大方程式<sup>\*</sup>」を組み合わせることで評価することとした。

なお、評価ガイド<sup>9)</sup>では、**FARSITE** の使用を推奨している。しかし、本報告書においては、「3.1 火災延焼シナリオ」で示した通り発火点を大洗研究開発センター近傍に設定しており、**FARSITE** による大規模な火災延焼シナリオの想定を有する必要性がないため、今回の評価では使用しない。

##### 4.1 Rothermel の拡大方程式

**Rothermel** の拡大方程式<sup>18)</sup>は、地表火を対象とした林野火災の延焼速度予測モデルで、**FARSITE** においても地表火の評価に同モデルが基本式として用いられている。**Rothermel** の拡大方程式は（1）式を基礎とする可燃物の熱収支式である。（1）式のパラメータにおいて、直接測定することが困難なものについては、実験式より近似値を与えている。そして、この部分が理論的に解明された場合には、理論式に置き換えていくという方針でモデルは設計されている。

$$R = \frac{\text{火線より放出される熱量}}{\text{可燃物の着火に必要な熱量}} = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

**Rothermel** の拡大方程式を Table 4.1 に、計算に必要なパラメータを Table 4.2 にそれぞれ示す。Table 4.2 に示した可燃物の性状に関するパラメータのうち、 $h$ 、 $\rho_b$ 、 $\sigma$ 、 $M_x$ 、 $S_e$ 、及び  $S_T$  の 6 つは可燃物の燃焼特性を示すパラメータで、あらかじめ実験などで調べておく必要があり、可燃物の種類ごとの固定値となる。本報告書においては、 $w_0$  及び  $M_f$  を含む 8 つのパラメータについて、後藤らの文献<sup>17)</sup>を参考にして入力値を決定した。具体的な入力値については、「5.1 入力条件」に示す。

---

※**Rothermel** の拡大方程式は、文献によって **Rothermel** の延焼速度予測モデルや **Rothermel** モデル等様々な呼び名があるが、本報告書では評価ガイド<sup>9)</sup>を参考に「**Rothermel** の拡大方程式」で統一している。

## 4.2 Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System

FBP System は、燃料、天候、地形等の入力情報から、火炎挙動に係る 4 つの重要な構成要素（延焼速度、燃料消費量、前線の火線強度及び火災形態（地表火・樹冠火））を出力する。FBP System の構成を Fig.4.1 に示す。入力情報である植生は、16 種類の燃料タイプから選ぶ選択式となっており、それぞれに可燃物量を試算するための構成式が与えられている。Table 4.3 に本評価に用いたシステムの構成式を、Table 4.4 に選択可能な燃料タイプをそれぞれ示す。なお、Table 4.3 では、植生タイプとしてアカマツ（C-5）を対象としている。その他の植生タイプでは、可燃物量、延焼速度等の式が異なる可能性があるので注意が必要である。

延焼速度を算出する際の重要なパラメータとして、Initial Spread Index (ISI)がある。ISI は、延焼速度の相対的な指標となるもので、FFMC 及び風速に関するパラメータから構成される。ISI の算出は、(20) ～ (32) 式の各パラメータを算出した後 (33) 式によって行う。

---

※FBP System の各パラメータ表記については、日本語訳による語彙の誤解を防ぐため、英語表記のままとしている。

## 5. 森林火災の強度等の算出

### 5.1 入力条件

「4. 評価に使用したモデル」で示した通り、森林火災の評価の際の主な入力パラメータは、植生データ、気象データ及び地形データである。

#### (1) 植生データ

大洗研究開発センターには、アカマツ（クロマツ）、スギ、ヒノキ、コナラ、クヌギ等の様々な植物が生息している。本評価においては、その中でも延焼速度が速く輻射熱（火炎輻射強度）が最も大きくなるアカマツを代表植生として選定した。なお、アカマツを代表植生として選定した理由については、Appendix 2に記載する。

#### (2) 気象データ

Rothermel の拡大方程式及び FBP System において、特に重要な気象データは風速である。風速については、評価ガイド<sup>9)</sup>において「過去 10 年間の最大風速を設定する。」としている。大洗研究開発センター近辺の気象台は、水戸地方気象台である。本評価を行った当時（2013 年 11 月頃）の過去 10 年間の最大風速は、 $17.4\text{m s}^{-1}$ （2013 年 10 月観測）であることから、この値を用いることとした。

ただし、水戸地方気象台の観測機器は、地表から 14.7m の場所に設置されており、風速もその位置での値である。地表面での風速は、草木等の障害物の影響により遅くなることが予想される<sup>17), 20), 21)</sup>。本評価においては、Rothermel (1983)<sup>21)</sup>に基づき、大洗研究開発センターの植生、地形等に類似している場合に用いられる係数 0.3 を水戸地方気象台での最大風速 ( $17.4\text{m s}^{-1}$ ) に乗じて評価に使用した。

#### (3) 地形データ

地形データとして傾斜角度は、Rothermel の拡大方程式及び FBP System の延焼速度等に影響する。上り斜面において延焼速度等は増加するが、廃棄物管理施設周辺の林は平坦である地形が多く、廃棄物管理施設に向かって上り斜面が継続的に続く坂道は存在しない。よって、評価の際には、傾斜角度を  $0^\circ$  として設定した。

### 5.2 モデル別詳細な入力値

#### (1) Rothermel の拡大方程式の入力値

Rothermel の拡大方程式の評価においては、Table 4.2 に示すパラメータの設定が必要である。このパラメータのうち、植生データ ( $h$ ,  $\rho_b$ ,  $\sigma$ ,  $M_x$ ,  $S_e$ ,  $S_T$ ,  $w_0$ 及び $M_f$ ) については、実験等によって可燃物（落葉）の燃焼特性を直接測定している後藤ら (2005)<sup>17)</sup>のパラメータ値を引用した。風速及び傾斜角度については、「5.1 入力条件」で示した通りである。Table 5.1 に本評価で設定した Rothermel の拡大方程式の具体的な入力値を示す。

## (2) Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System の入力値

FBP System の入力パラメータは、Table 4.5 の通りである。これらパラメータのうち、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $q$ 、 $BUI_0$ 、 $CBH$ 及び $CFL$ は Table 4.6 の燃料タイプ (C-5) のパラメータ値を設定した。 $FFMC$ 及び $BUI$ については、カナダのノバスコシア州が作成した森林火災に関するガイド<sup>22)</sup>の中で、それぞれのパラメータ値の危険度を分類しており (Table 5.2)、本評価では極値である Extreme を用いることとした。 $WS$ 及び $\alpha$ は、「5.1 入力条件」の通りとし、これらパラメータの方位角 ( $WAZ$ 及び $SAZ$ ) は  $0^\circ$  で設定した。以上を踏まえて、Table 5.3 に本評価で設定した FBP System の具体的な入力値を示す。

## 5.3 その他計算に係る検討事項

### (1) 各モデルの組み合わせによる考慮

本評価では、FBP System による計算の妥当性を確認する意図を踏まえて、Rothermel の拡大方程式と組み合わせる事としている。FBP System は地表火及び樹冠火を、Rothermel の拡大方程式は地表火をそれぞれ対象としているが、単純に両モデルの計算結果を足し合わせた場合、地表火の評価結果が過大となる。そこで、本評価においては、FBP System を計算する際に、(34) 式の Surface Fuel Consumption (SFC) から Rothermel の拡大方程式で設定した可燃物量 ( $w_0 = 0.5\text{kg m}^{-2}$  (Table 5.1)) を差し引くことで SFC の値を調整している。

### (2) 樹木の密集度の考慮

廃棄物管理施設周辺の林は樹木の密集度が比較的低いため、本評価においては、以下の通り樹木の密集度を考慮するための係数 ( $\phi$ ) を算定し、(34) 式の Surface Fuel Consumption (SFC) に乗ずることにより補正を行っている。

#### 【樹木の密集度を考慮するための係数 ( $\phi$ ) の算定】

樹木の密集度を考慮するための係数 ( $\phi$ ) は、現地調査結果、上空写真<sup>16)</sup>等を使用して、延焼する場所の樹木の密集度から求めた。Fig.5.1 に施設に到達する火炎の評価上の燃焼範囲と樹木の樹冠部に対する概略図を示す。破線で囲まれた箇所は評価上にて燃焼する範囲、丸・三角枠 (①～⑧) は樹木の樹冠部を表している。なお、評価上の燃焼範囲については、「6. 施設への輻射熱による影響評価」を参照のこと。

- ・燃焼する範囲は、

$$67.5\text{m} \times 15\text{m} = 1010\text{m}^2$$

- ・燃焼する範囲の樹冠面積は、

$$\text{①}20.2\text{m}^2 \text{ ②}36.8\text{m}^2 \text{ ③}15.6\text{m}^2 \text{ ④}25.7\text{m}^2 \text{ ⑤}25.7\text{m}^2 \text{ ⑥}25.7\text{m}^2 \text{ ⑦}62.3\text{m}^2 \text{ ⑧}82.6\text{m}^2$$

となり、①から⑧の合計値は、約 $300\text{m}^2$ となる。

- ・固体集積保管場Ⅱ周辺の樹冠率は

$$300\text{m}^2 \div 1010\text{m}^2 \approx 0.3$$

よって、樹木の密集度を考慮するための係数 ( $\phi$ ) を 0.3 とした。



各モデルの組み合わせ及び樹木の密集度の考慮から (34) 式の Surface Fuel Consumption (SFC)を以下の通り変形する。

$$SFC = (5.0 \times [1 - \exp(-0.0149 \times BUI)]^{2.48} - w_0) \times \phi \quad (45)$$

$\phi$  : 樹木の密集度を考慮するための係数で 0.3 を代入

$w_0$  : Rothermel の拡大方程式で設定した可燃物量 ( $w_0 = 0.5\text{kg m}^{-2}$ )

### (3) 評価に必要なパラメータの計算式

森林火災による影響評価に際し、施設壁面温度等の評価には火炎輻射強度、延焼速度等、防火帯幅の検討には火線強度等の算出がそれぞれ必要である。しかし、Rothermel の拡大方程式は火線強度が、FBP System は火炎輻射強度が算出されない。そこで、以下に示す計算式を用いて、各モデルの不足するパラメータ等を算出する。

$$I_B = I_R \frac{12.6R}{\sigma} \quad (46) \text{ 9)}$$

$I_B$  : 火線強度 [ $\text{kW m}^{-1}$ ]

$I_R$  : 火炎輻射強度 [ $\text{kW m}^{-2}$ ]

$\sigma$  : 可燃物の表面積/体積比 [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$$L_f = 0.0775I_B^{0.46} \quad (47) \text{ 9)}$$

$L_f$  : 火炎長 [m]

$$H_A = I_B \frac{60}{R} \quad (48) \text{ 9)}$$

$H_A$  : 単位面積当たり熱量 [ $\text{kJ m}^{-2}$ ]

$$t_r = \frac{H_A}{I_R} \quad (49) \text{ 23)}$$

$t_r$  : 燃焼継続時間 [s]

## 5.4 算出結果

FBP System 及び Rothermel の拡大方程式で計算した森林火災の強度の算出結果を Table 5.4 に示す。FBP System 及び Rothermel の拡大方程式は評価に用いるパラメータがそれぞれ異なるため (Table 4.2 及び Table 4.5 を参照。)、単純に両者の評価結果を比較する事は出来ないが、施設への到達時間等を評価する延焼速度については、Rothermel の拡大方程式の評価 ( $3.38\text{m min}^{-1}$ ) の方が FBP System の評価 ( $2.54\text{m min}^{-1}$ ) よりも速くなる結果となった。

次章では、Table 5.4 で示した強度及び延焼速度の火災が廃棄物管理施設に接近した場合の熱影響評価を行う。

## 6. 施設への輻射熱による影響評価

評価ガイド<sup>9)</sup>では、米国農務省が開発した FARSITE の使用を推奨している。しかし、評価ガイド<sup>9)</sup>の示す FARSITE による評価法では、広範囲（12km×12km）に渡る植生等の地理情報を入力する必要があり、新規基準の対象となる全ての原子力施設で同方法を用いる事は困難である。そこで、本報告書では FARSITE は用いずに、比較的取扱いが簡便な Rothermel の拡大方程式及び FBP System の森林火災（林野火災）評価モデルを用いて簡易評価を行った。本章では、想定した森林火災からの輻射熱による施設への熱影響評価を行う。

### 6.1 輻射熱が施設に到達する距離

想定した火災発生元と廃棄物管理施設（固体集積保管場Ⅱ）の地理情報を把握するために現地調査を行った結果、火災発生元と廃棄物管理施設の間には高台が存在することが確認された（Fig.6.1）。従って、発生した火災は、上り斜面→高台→下り斜面の順で廃棄物管理施設周辺の最も近い樹木へと延焼する事が予測される。その際、火災により発生した輻射熱は、上り斜面では地面に遮られると考え、斜面から高台に切り替わる場所を輻射熱が届き始める地点（輻射熱開始地点：施設から 75m）とした。距離は上空写真<sup>10)</sup>等により算出した。

### 6.2 施設に到達する火炎の幅（火炎到達幅）

火炎到達幅は、火炎が輻射熱開始地点から廃棄物管理施設に迫ってくる際に、経過時間に伴い横方向に広がる火炎の幅から 15m と設定した。具体的な算定方法は以下の通り。

#### 【火炎到達幅の算定】

風向は火炎の進行方向に対して追い風を設定しているため、進行方向に対して横方向の風速は  $0\text{ m s}^{-1}$  と仮定する。風速を  $0\text{ m s}^{-1}$ 、それ以外のパラメータ値を Table 5.1 及び Table 5.3 で設定した場合における各モデルの延焼速度は、FBP System が  $0.136\text{ m min}^{-1}$ 、Rothermel の拡大方程式が  $0.118\text{ m min}^{-1}$  である。

火炎が輻射熱開始地点（施設から 75m）から施設に最接近（7.5m）するまでの時間は、

$$\text{FBP System} : \frac{75-7.5}{2.54} = 26.6\text{min}$$

$$\text{Rothermel の拡大方程式} : \frac{75-7.5}{3.38} = 20.7\text{min}$$

この間に横方向に広がる火炎の幅は、

$$\text{FBP System} : 0.136 \times 26.6 \times 2 = 7.24\text{m}$$

$$\text{Rothermel の拡大方程式} : 0.118 \times 20.7 \times 2 = 4.89\text{m}$$

以上の結果より、試算した横方向の火炎の幅は最大 7.24m であるが、本算定法に対する安全性を考慮しておおよそ 2 倍の 15m を火炎到達幅とした。

### 6.3 火炎延焼距離

本評価モデルでは、廃棄物管理施設に最接近した火炎は、その後横方向に延焼すると仮定している。その際の横方向への火炎延焼距離は、敷地境界までと敷地北西部にあるグラウンドまでの距離を合計した距離 290m とした (Fig.6.2)。

### 6.4 受熱点の輻射熱評価

森林火災からの輻射熱に対する影響評価について、評価ガイド<sup>9)</sup>を基に円筒火災をモデルとする「円筒火災モデル」を用いる。円筒火災モデルでは、火災の燃焼範囲に対して、特定の半径を持つ円筒火災の集合体を仮定する。本評価では評価ガイド<sup>9)</sup>に基づき、各円筒火災の燃焼半径を火炎長の 3 分の 1 とし、廃棄物管理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。

#### (1) 燃焼半径の算出

次の式から燃焼半径を算出する。火炎長は Table 5.4 で記した値を用いる。

$$R = \frac{H}{3} \quad (50) \quad 9)$$

$R$  : 燃焼半径 [m]

$H$  : 火炎長 [m]

#### (2) 円筒火災モデル数の算出

次の式から円筒火災モデル数 $F$ を算出する。火炎到達幅は、廃棄物管理施設へ迫る火炎については「6.2 施設に到達する火炎の幅 (火炎到達幅)」で示した値を、廃棄物管理施設から横方向へ延焼する火炎については、「6.3 火炎延焼距離」で示した値を用いる。

$$F = \frac{W}{2R} \quad (51) \quad 9)$$

$W$  : 火炎到達幅 [m]

$R$  : 燃焼半径 [m]

#### (3) 形態係数の算出

次の式から各円筒火災モデルの形態係数 $\phi_i$ を算出する。

$$\phi_i = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right] - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left[ \sqrt{\frac{n-1}{n+1}} \right] \right\} \quad (52) \quad 9)$$

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

$L_i$  : 離隔距離 [m]

$R$  : 燃焼半径 [m]

$H$  : 火炎長 [m]

(52) 式に示した各円筒火災モデルの形態係数 $\phi_i$ を合計した値が、廃棄物管理施設に及ぼす影響について考慮すべき形態係数 $\phi_t$ となる。

$$\phi_t = (\phi_i + \phi_{i+1} + \phi_{i+2} \dots) \quad (53) \quad 9)$$

なお、 $i + (i + 1) + (i + 2) + \dots + (i + x)$ の円筒火炎モデル数の合計は F 個となる。また、想定した円筒火炎モデルのモデル図を Fig.6.3 に示す。

#### (4) 輻射強度の算出

廃棄物管理施設に対する輻射強度は次式によって与えられる。

$$E = R_f \cdot \phi_t \quad (54) \quad 9)$$

$E$  : 輻射強度 [W m<sup>-2</sup>]

$R_f$  : 火炎輻射発散度 [W m<sup>-2</sup>]

$\phi_t$  : 形態係数 [-]

火炎輻射発散度は火炎輻射強度（反応強度）に 0.377 を乗じたものである。これは、火炎輻射強度（反応強度）のうち輻射の割合を示す値で、針葉樹は 0.377、落葉広葉樹は 0.371 である<sup>24)</sup>。（パラメータの引用元：SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering<sup>25)</sup>）。

#### (5) 前進差分による数値計算

受熱面の温度は、輻射強度が時間的に変化することを考慮して、一次元非定常熱伝導を前進差分法を用いて数値計算する。一次元の非定常熱伝導について、温度伝導率を $\alpha$ 、温度を $T$ 、コンクリート深さを $x$ とすると、 $x$ 方向の一次元温度分布は次式で表される。

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \quad (55)$$

上式について $x = 0$ の時に境界条件を与えて、前進差分法を用いて評価する。その際の距離と時間軸の分割の概略図を Fig.6.4 に示す。

$$T_{i,n+1} = \left(\frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2}\right)(T_{i+1,n} - 2T_{i,n} + T_{i-1,n}) + T_i \quad (56)$$

$x = 0$ の時の境界条件

$$E = -\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (57)$$

なお、今回の評価には用いていないが、輻射強度（熱流束）が一定の様な場合には、次式による解法が与えられる。

$$T = T_0 + \frac{2E\sqrt{\alpha t}}{\lambda} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] \quad (58) \quad 26)$$

$T_0$  : 初期温度 [°C]

$E$  : 輻射強度 [W m<sup>-2</sup>]

$\alpha$  : コンクリート温度伝導率 [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]

$t$  : 経過時間 [s]

$x$  : コンクリート深さ [m]

これまでに設定した廃棄物管理施設に及ぼす森林火災の影響評価条件を Fig.6.5 にまとめる。

## 7. 評価結果

### 7.1 施設外壁温度の評価結果

「5. 森林火災の強度等の算出」及び「6. 施設への輻射熱による影響評価」を基に、輻射熱による廃棄物管理施設の壁面温度の経時変化を Fig.7.1 に示す。図において、Rothermel の拡大方程式による地表火が施設へ最接近した時の外壁温度は約 120℃、Canadian Forest Fire Behavior Prediction System による地表火又は樹冠火が最接近した時の温度は約 160℃であった。一般にコンクリートの強度に影響がないとされている許容温度\* (200℃) には達しないことが明らかになった。また、今回設定したコンクリート壁厚 (40cm) に対して、内壁温度の上昇は 0.1℃程度であり、輻射熱による室内への温度影響はわずかであることも確認できた。

### 7.2 防火帯突破確率の評価結果

次に、「5.4 算出結果」を基に、廃棄物管理施設周辺の防火帯相当エリアに対する防火帯突破確率を評価する。なお、評価ガイド<sup>9)</sup>では、原子炉施設に対する必要な防火帯幅として、「火災の防火帯突破確率 1%の値を発電所に最低限必要な防火帯幅とする。」としている。

Fig.7.2 に火線強度に対する防火帯の相関図を示す。森林火災の強度の算出結果 (Table 5.4) において、Rothermel の拡大方程式の火線強度は 104kW m<sup>-1</sup>、FBP System の火線強度は 204kW m<sup>-1</sup>で、合計した火線強度は 308kW m<sup>-1</sup>である。廃棄物管理施設の風上 20m には樹木が存在するので、火線強度 308kW m<sup>-1</sup>、防火帯相当エリア幅 7.5m とすると、Fig.7.2(B)より防火帯突破確率は約 20%となった。原子炉施設に対する要求である防火帯突破確率 1%よりも高い数値ではあるが、防火帯相当エリアの先は耐火性を有する建物であるため、仮に火の粉が防火帯相当エリアを突破したとしても問題ないものと考えた。

なお、この防火帯幅の突破確率については、Wilson (1988)<sup>28)</sup>により定量的な算定が可能である。以下にその計算式を示す。

$$P = \frac{\exp(b'x)}{1+\exp(b'x)} \quad (59) \quad 28)$$

$$b'x = 1.36 + 0.36x_1 + (0.61x_2 - 0.99)x_3 \quad (60) \quad 28)$$

$P$  : 防火帯突破確率 [-]

$x_1$  : 火線強度 [MW m<sup>-1</sup>]

$x_2$  : 20m 以内の樹木の有無 (有の場合 : 1、無の場合 : 0)

$x_3$  : 防火帯幅 [m]

上式を用いて、今回の評価結果から防火帯突破確率を算出すると 20.1%となる。なお、評価ガイド<sup>9)</sup>の相関図 (Fig.7.2) の大元の引用元は Wilson (1988)<sup>28)</sup>である。

\*許容温度 : 「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)<sup>27)</sup>」に基づき、コンクリート圧縮強度が維持される保守的な温度 200℃を許容温度とする。

## 8. 結論

本報告書は、大洗研究開発センターに所在する廃棄物管理施設の新規制基準への適合を評価するために行った様々な検討・対策のうち、廃棄物管理施設における森林火災の及ぼす影響評価結果を示すものである。影響評価として、森林火災からの輻射熱による施設外壁への影響及び森林火災の強度から廃棄物管理施設周辺に設けている防火帯相当エリア（7.5m）の突破確率を評価した。

評価ガイド<sup>9)</sup>が推奨する FARSITE による評価法は、広範囲（12km×12km）に渡る植生等の地理情報を入力する必要がある、新規制基準の対象となる全ての原子力施設等で同方法を用いる事は困難である。そこで、本報告書では FARSITE は用いずに、比較的取扱いが簡便な Rothermel の拡大方程式及び FBP System の森林火災（林野火災）評価モデルを用いて簡易評価を行った。

評価の結果、廃棄物管理施設の施設外壁温度は最大で約 160℃であり、一般にコンクリートの強度に影響がないとされている許容温度（200℃）には達しないことを確認した。さらに、防火帯相当エリアの突破確率は約 20%と試算された。これは、原子炉施設に対する要求である防火帯突破確率 1%よりも高い数値ではあるが、防火帯相当エリアの先は耐火性を有する建物であるため、仮に火の粉が防火帯相当エリアを突破したとしても問題ないものと考えた。

FARSITE による大規模な詳細評価が困難な原子力施設等における森林火災評価法を検討する上で、本評価は有効に適用できると考えられる。

## 謝辞

本報告書を編集するに当たり、ご協力頂いた環境保全部廃棄物管理課の工藤健治氏及び環境保全部環境技術課の福井康太氏に敬意を表する。

参考文献

- 1)原子力規制委員会 HP：新規制基準について, available from [http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin\\_kisei\\_kijyun.html](http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin_kisei_kijyun.html) (accesses 2015-08-07).
- 2)原子力規制委員会 HP：廃棄事業の安全規制, available from <https://www.nsr.go.jp/archive/nisa/genshiryoku/haiki/kanri.html> (accesses 2015-07-23).
- 3)UNECE Report：“FOREST FIRE STATISTICS 1999-2001”, ECE-TIM-BULL 4, (2002).
- 4)ECJRC Scientific and Technical Report：“Forest Fires in Europe 2009”, Report No 10, (2010).
- 5)林野庁 HP：近年の林野火災の発生状況, available from [http://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con\\_1.html](http://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/con_1.html) (accesses 2015-07-13).
- 6)総務省消防庁：“平成 26 年版消防白書”, 勝美印刷, pp.54-55 (2014).
- 7)日本火災学会：“火災便覧 第 3 版”, 共立出版, pp.559-568, pp.1085-1090 (1997).
- 8)小林忠一, 玉井幸治, 服部重昭, 西山嘉寛：“林野火災の延焼速度に関する実験的研究—傾斜角と林床可燃物量の影響—”, 日林誌, 71, 1, pp.73-77 (1991).
- 9)原子力規制委員会：“原子力発電所の外部火災影響評価ガイド”, (2012).
- 10)Finney, M.A.：“FARSITE: Fire Area Simulator—Model Development and Evaluation”, USDA Forest Service, Research Paper RMRS-RP-4, (2004).
- 11)原子力安全基盤機構：“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-Report Series, JNES-RC-2012-0002, (2012).
- 12)McArthur, A.G.：McArthur Grassland Fire Danger Meter Mk5, <http://www.firebreak.com.au/grassmk5.html> (accesses 2015-07-21).
- 13)Nobel, I.R., Bary, G.A.V., Gill, A.M.：“McArthur’s fire-danger meters expressed as equations”, Australian Journal of Ecology, 5, pp.201-203 (1980).
- 14)Alexander, M.E., Fogaty, L.G.：“Fire Technology Transfer Note”, Number-25, (June 2002).
- 15)Forestry Canada Fire Danger Group：“Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System”, Information Report ST-X-3, (1992).
- 16)国土地理院 HP：地図・空中写真・地理調査, available from <http://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html> (accesses 2016-01-20).
- 17)後藤義明, 玉井浩司, 深山貴文, 小南裕志：“日本で発生する山火事の強度の検討—Rothermel の延焼速度予測モデルを用いた Byram の火線強度の推定—”, 日林誌, 87, 3, pp.193-201 (2005).
- 18)Rothermel, R.C.：“A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING FIRE SPREAD IN WILDLAND FUELS”, USDA Forest Service, Research Paper INT-115, (1972).
- 19)Van Wagner, C.E.：“Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System”, Canadian Forest Service, Forestry Technical Report 35, (1987).

- 20) Albin, F.A. : “ESTIMATING WILDFIRE BEHAVIOR AND EFFECTS”, USDA Forest Service, General Technical Report INT-30, (1976).
- 21) Rothmel, R.C. : “How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires”, USDA Forest Service, General Technical Report INT-143, (1983).
- 22) Wildfire Management Group : “MEDIA GUIDE TO FOREST FIRES”, Natural Resources, (2009).
- 23) Scott, Joe H. : “Introduction to Wildfire Behavior Modeling”, National Interagency Fuels, Fire & Vegetation Technology Transfer, (2012).
- 24) 北海道電力株式会社 : “泊発電所 3 号機 外部火災の影響評価について 補足説明資料”, (2013).
- 25) Philip J. D. et al. : “THE SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering fourth edition”, National Fire Protection Association, Quincy, MA, (2008).
- 26) 庄司正弘 : “電熱工学”, 東京大学出版会, pp.59-62 (1995).
- 27) 原田和典 : “建築火災のメカニズムと火災安全設計”, 日本建築センター情報事業部, (2007).
- 28) Wilson, A.A.G. : “Width of firebreak that is necessary to stop grass fires : some field experiments”, Canadian Journal of Forest Research, 18, 6, pp.682-687 (1988).
- 29) 根岸英一 : “世界の森林火災と航空消火について<第 1 報>”, 環境・消防技術開発センター機関誌「環境と消防」, 1, 1, pp.2-7 (2011).



Table 1.1 廃棄物管理施設の操業状況<sup>2)</sup>

廃棄事業者名	日本原燃株式会社	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
工場名又は事業所名	再処理事業所	大洗研究開発センター
所在地	青森県上北郡六ヶ所村	茨城県東茨城郡大洗町
施設の種類	特定廃棄物管理施設 (※1)	特定廃棄物管理施設 (※1)
対象廃棄物の種類及び事業内容	使用済燃料の再処理に伴い発生する高レベル放射性液体廃棄物をステンレス鋼製容器にガラス固化したもので、海外から返還されるもの(※2)の保管	大洗研究開発センター、東北大学金属材料研究所及び日本核燃料開発(株)における原子炉の運転及び核燃料物質の使用に伴って発生する液体状廃棄物の化学処理又は蒸発処理、固体状廃棄物の圧縮、細断又は焼却処理、及びこれらの固化体の保管
対象廃棄物の放射性物質濃度レベル(※2)	高レベル放射性廃棄物	比較的濃度の高い低レベル放射性廃棄物及び低レベル放射性廃棄物
最大管理能力	ガラス固化体 1,440 本	200 リットルドラム缶 42,795 本相当
事業(変更)許可年月日	平成 4 年 4 月 3 日	平成 4 年 3 月 30 日
事業開始年月日	平成 7 年 4 月 26 日	平成 8 年 3 月 29 日

※1 特定廃棄物管理施設：

3.7 テラベクレル以上の核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物を管理する廃棄物管理施設

※2 海外から返還される高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)：

国外の再処理施設における再処理に伴って発生する高レベル放射性廃棄物は、現地でガラス固化された後、安全対策を施した専用輸送船により我が国に返還されることとなっており、青森県六ヶ所村にある日本原燃株式会社の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターで 30～50 年間程度貯蔵されることになっている。ガラス固化体の輸送は、平成 7 年 2 月より開始され、平成 20 年末までに 1,310 本が仏国より返還されており、今後、英国よりの返還が開始される予定である。

Table 4.1 Rothermel の拡大方程式<sup>18)</sup> (1/2)

式	説明	単位	式番号
$R = \frac{\text{火線より放出される熱量}}{\text{可燃物の着火に必要な熱量}}$ $= \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$	延焼速度	m min <sup>-1</sup>	(1)
$I_R = \Gamma' w_n h \eta_M \eta_S$	燃焼による単位時間当たりの放出熱量 (火炎輻射強度)	kJ min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	(2)
$\Gamma' = \Gamma'_{max} \left( \frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A \exp \left[ A \left( 1 - \frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right]$	理想熱分解速度 (絶乾状態の $\alpha$ セルロースの熱分解速度)	min <sup>-1</sup>	(3)
$\Gamma'_{max} = 168.28 \sigma^{1.5} (495 + 9.9956 \sigma^{1.5})^{-1}$	最大熱分解速度	min <sup>-1</sup>	(4)
$\beta_{op} = 0.20395 \sigma^{-0.8189}$	熱分解速度が最大となる時の $\beta$	—	(5)
$A = \frac{1}{6.7187 \sigma^{0.1} - 7.27}$	定数	—	(6)
$\eta_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left( \frac{M_f}{M_x} \right)^2 - 3.52 \left( \frac{M_f}{M_x} \right)^3$	可燃物中の水分による熱分解速度減少係数	—	(7)
$\eta_S = 0.174 S_e^{-0.19}$	可燃物中の無機物による熱分解速度減少係数	—	(8)
$\xi = (192 + 7.9096 \sigma)^{-1} \exp[(0.792 + 3.7597 \sigma^{0.5})(\beta + 0.1)]$	隣接する可燃物の加熱に消費される放出熱量の割合	—	(9)
$\phi_W = C (196.85 U)^B \left( \frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$	風による割増し係数	—	(10)
$C = 7.47 \exp(-0.87108 \sigma^{0.55})$	定数	—	(11)
$B = 0.15988 \sigma^{0.54}$	定数	—	(12)
$E = 0.715 \exp(-0.010942 \sigma)$	定数	—	(13)
$w_n = \frac{w_o}{1 + S_T}$	可燃物中の有機物量	kg m <sup>-2</sup>	(14)
$\phi_S = 5.275 \beta^{-0.3} (\tan(\phi))^2$	傾斜による割増し係数	—	(15)
$\rho_b = \frac{w_0}{\delta}$	可燃物の堆積密度	kg m <sup>-3</sup>	(16)

Table 4.1 Rothermel の拡大方程式<sup>18)</sup> (2/2)

式	説明	単位	式番号
$\varepsilon = \exp\left(\frac{-4.5276}{\sigma}\right)$	炎によって着火温度まで加熱される可燃物の割合	—	(17)
$Q_{ig} = 581.42 + 2595.5M_f$	単位重量当たりの可燃物が着火するまでに必要な熱量	kJ kg <sup>-1</sup>	(18)
$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p}$	可燃物の堆積密度と比重の比	—	(19)

Table 4.2 Rothermel の拡大方程式におけるパラメータ<sup>18)</sup>

パラメータ	説明	単位
$h$	可燃物の低位発熱量	kJ kg <sup>-1</sup>
$\rho_b$	可燃物の真の密度	kg m <sup>-3</sup>
$\sigma$	可燃物の表面積－体積比	cm <sup>-1</sup>
$M_x$	限界含水量	—
$S_e$	可燃物中のシリカ以外の無機含有量	—
$S_T$	可燃物中の無機含有量	—
$w_0$	単位面積当たりの可燃物量	kg m <sup>-2</sup>
$M_f$	可燃物の含水率	—
$\delta$	可燃物の堆積深	m
$\phi$	傾斜角度	°
$U$	炎の中央部の高さの風速	m s <sup>-1</sup>

Table 4.3 FBP System<sup>15)</sup> (1/2)

(ただし、植生タイプはアカマツ (C-5) を対象。)

式	説明	単位	式番号
$m = \frac{147.2 \times (101 - FFMC)}{59.5 + FFMC}$	Variable number in FFMC function	—	(20)
$f(F) = 91.9 \times \exp(-0.1386 \times m) \times \left[ 1 + \frac{m^{5.31}}{4.93 \times 10^7} \right]$	FFMC function in the ISI	—	(21)
$ISZ = 0.208 \times 1 \times f(F)$	ISI, with zero wind on level ground	—	(22)
$RSZ = a \times [1 - \exp(-b \times ISZ)]^c$	Surface spread rate with zero wind on level terrain (C-1 to C-5, and C-7)	m min <sup>-1</sup>	(23)
$\%Ground\ slope = 100 \times \tan(a)$	Percent ground slope	%	(24)
$SF = \exp \left[ 3.533 \times \left( \frac{GS}{100} \right)^{1.2} \right]$	Slope factor, upslope	—	(25)
$RSF = RSZ \times SF$	Surface spread rate with zero wind, upslope	m min <sup>-1</sup>	(26)
$ISF = \frac{\ln \left[ 1 - \left( \frac{RSF}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \right]}{-b}$	ISI, with zero wind upslope	—	(27)
$WSE = \frac{\ln \left[ \frac{ISF}{0.208 \times f(F)} \right]}{0.05039}$	Slope equivalent wind speed	km h <sup>-1</sup>	(28)
$WSX = [WS \times \sin(WAZ)] + [WSE \times \sin(SAZ)]$	Net vectored wind speed in the x-direction	km h <sup>-1</sup>	(29)
$WSY = [WS \times \cos(WAZ)] + [WSE \times \cos(SAZ)]$	Net vectored wind speed in the y-direction	km h <sup>-1</sup>	(30)
$WSV = \sqrt{WSX^2 + WSY^2}$	Net vectored wind speed	km h <sup>-1</sup>	(31)
$f(W) = \exp(0.05039 \times WSV)$	Wind function in the ISI	—	(32)
$ISI = 0.208 \times f(W) \times f(F)$	Final ISI, accounting for wind and slope	—	(33)
$SFC = 5.0 \times [1 - \exp(-0.0149 \times BUI)]^{2.48}$	Surface fuel consumption	kg m <sup>-2</sup>	(34)
$RSI = a \times [1 - \exp(-b \times ISI)]^c$	Initial spread rate without BUI effect	m min <sup>-1</sup>	(35)

Table 4.3 FBP System<sup>15)</sup> (2/2)

(ただし、植生タイプはアカマツ (C-5) を対象。)

式	説明	単位	式番号
$BE = \exp\left(50 \times \ln(q) \times \left(\frac{1}{BUI} - \frac{1}{BUI_0}\right)\right)$	Buildup effect on spread rate	—	(36)
$ROS = RSI \times BE$	Rate of spread on surface fire	m min <sup>-1</sup>	(37)
$CSI = 0.001 \times CBH^{1.5} \times (460 + 25.9 \times FMC)^{1.5}$	Critical surface fire intensity for crowning	kW m <sup>-1</sup>	(38)
$RSO = \frac{CSI}{300 \times SFC}$	Critical spread rate for crowning	m min <sup>-1</sup>	(39)
$CFB = 1 - \exp(-0.23 \times (ROS - RSO))$	Crown fraction burned	—	(40)
$ROS = RSI \times BE$	Final spread rate, surface or crown fire	m min <sup>-1</sup>	(41)
$CFC = CFL \times CFB$	Crown fuel consumption	kg m <sup>-2</sup>	(42)
$TFC = SFC + CFC$	Total fuel consumption	kg m <sup>-2</sup>	(43)
$FI = 300 \times TFC \times ROS$	Fire intensity	kW m <sup>-1</sup>	(44)

※1 (22) 式及び (23) 式は、それぞれ (33) 式及び (35) 式の変形で本報告書において新たに設定したものである。FBP System の論文<sup>15)</sup>では、(22) 式及び (23) 式の該当する箇所において、(33) 式及び (35) 式を用いることになるが、これには  $f(W) = 1$ 、 $ISI = ISZ$  と解釈する必要がある。そのため、本報告書では誤解する事のない様に新たに (22) 式及び (23) 式を導入した。

※2 「5.3 その他計算に係る検討事項」において、(34) 式を変形し新たに (45) 式を導入している。本評価の際には (45) 式を用いる。

Table 4.4 FBP System の燃料タイプ<sup>15)</sup>

Group	Identifier	Descriptive name
Coniferous	C-1	Spruce-lichen woodland
	C-2	Boreal spruce
	C-3	Mature jack or lodgepole pine
	C-4	Immature jack or lodgepole pine
	C-5	Red and white pine
	C-6	Conifer plantation
	C-7	Ponderosa pine-Douglas-fir
Deciduous	D-1	Leafless aspen
Mixedwood	M-1	Boreal mixedwood-leafless
	M-2	Boreal mixedwood-green
	M-3	Dead balsam fir mixedwood-leafless
	M-4	Dead balsam fir mixedwood-green
Slash	S-1	Jack or lodgepole pine slash
	S-2	White spruce-balsam slash
	S-3	Coastal cedar-hemlock-Douglas-fir slash
Open	O-1	Grass

Table 4.5 FBP System の入力パラメータ <sup>15)</sup>

パラメータ	説明	単位
<i>a</i>	Rate of spread equation coefficients (植生タイプにより異なる (Table 4.6 を参照。))	—
<i>b</i>		—
<i>c</i>		—
<i>FFMC</i> (※1)	Fine Fuels Moisture Code	—
$\alpha$	Angle of Slope	°
<i>WAZ</i>	Wind azimuth	°
<i>SAZ</i>	Slope azimuth, upslope	°
<i>WS</i>	Observed wind speed	km h <sup>-1</sup>
<i>CBH</i>	Height to live crown base	m
<i>CFL</i>	Crown fuel load	kg m <sup>-2</sup>
<i>FMC</i>	Foliar moisture content	%
<i>BUI</i> (※2)	Buildup Index	—
<i>BUI</i> <sub>0</sub>	Average BUI for the fuel type	—
<i>q</i>	Proportion of maximum rate of spread at BUI equal to 50	—

※1 Fine Fuels Moisture Code (FFMC) Range : 0-100

Fine Fuels Moisture Code (FFMC)は、燃料（地表の落葉落枝等）の含水率を表し、燃料の発火のしやすさ及び燃えやすさの指標となる。このコードは、気温、相対湿度、風速、及び降水量から導き出されるが<sup>19)</sup>、本評価では固定値として設定している。

※2 Buildup Index (BUI) Range : 0-Unlimited

Buildup Index (BUI)は、燃料のうち実際に燃焼する量を相対的に表した指標である。これは、Duff Moisture Code (DMC)及び Drought Code (DC)から導き出されるが<sup>19)</sup>、本評価では固定値として設定している。

Table 4.6 各燃料タイプにおけるパラメータ値<sup>15)</sup>

燃料 タイプ	$a$	$b$	$c$	$q$	$BUI_0$	$CBH$ [m]	$CFL$ [kg m <sup>-2</sup> ]
C-1	90	0.0649	4.5	0.90	72	2	0.75
C-2	110	0.0282	1.5	0.70	64	3	0.80
C-3	110	0.0444	3.0	0.75	62	8	1.15
C-4	110	0.0293	1.5	0.80	66	4	1.20
C-5	30	0.0697	4.0	0.80	56	18	1.20
C-6	30	0.0800	3.0	0.80	62	7	1.80
C-7	45	0.0305	2.0	0.85	106	10	0.50
D-1	30	0.0232	1.6	0.90	32	*	*
M-1	*	*	*	0.80	50	6	0.80
M-2	*	*	*	0.80	50	6	0.80
M-3	*	*	*	0.80	50	6	0.80
M-4	*	*	*	0.80	50	6	0.80
S-1	75	0.0297	1.3	0.75	38	*	*
S-2	40	0.0438	1.7	0.75	63	*	*
S-3	55	0.0829	3.2	0.75	31	*	*
O-1a	190	0.0310	1.4	1.00	01	*	*
O-1b	250	0.0350	1.7	1.00	01	*	*



Table 5.1 Rothermel の拡大方程式で設定したパラメータ値

パラメータ	説明	パラメータ値	単位	備考
$h$	可燃物の低位発熱量	19958	$\text{kJ kg}^{-1}$	後藤ら (2005) 17)より引用
$\rho_b$	可燃物の真の密度	516.19	$\text{kg m}^{-3}$	
$\sigma$	可燃物の表面積-体積比	70.44	$\text{cm}^{-1}$	
$M_x$	限界含水量	0.31	—	
$S_e$	可燃物中のシリカ以外の無機含有量	0.024	—	
$S_T$	可燃物中の無機含有量	0.031	—	
$w_0$	単位面積当たりの可燃物量	0.5	$\text{kg m}^{-2}$	
$M_f$	可燃物の含水率	0.01	—	
$\delta$	可燃物の堆積深	0.02	m	
$\phi$	傾斜角度	0	°	
$U$	炎の中央部の高さの風速	5.22	$\text{m s}^{-1}$	5.1 入力条件

Table 5.2 ノバスコティア州が設定した森林火災に関する  
パラメータ値の危険度分類<sup>22)</sup>

Parameter	Low	Moderate	High	Extreme
<i>FFMC</i>	0.0	80.9	86.9	90.0
<i>DMC</i>	0.0	15.9	30.9	51.0
<i>DC</i>	0.0	140.0	240.0	341.0
<i>ISI</i>	0.0	2.2	5.0	10.0
<i>BUI</i>	0.0	20.2	36.0	61.0
<i>FWI</i>	0.0	3.0	10.0	23.0

Table 5.3 FBP System で設定したパラメータ値

パラメータ	説明	パラメータ値	単位	備考
<i>a</i>	Rate of spread equation coefficients	30	—	Table 4.6
<i>b</i>		0.0697	—	
<i>c</i>		4	—	
<i>FFMC</i>	Fine Fuels Moisture Code	90	—	※
$\alpha$	Angle of Slope	0	°	5.1 入力条件
<i>WAZ</i>	Wind azimuth	0	°	
<i>SAZ</i>	Slope azimuth, upslope	0	°	
<i>WS</i>	Observed wind speed	18.8	km h <sup>-1</sup>	5.1 入力条件
<i>CBH</i>	Height to live crown base	18	m	Table 4.6
<i>CFL</i>	Crown fuel load	1.2	kg m <sup>-2</sup>	Table 4.6
<i>FMC</i>	Foliar moisture content	85	%	Table 4.6
<i>BUI</i>	Buildup Index	61	—	※
<i>BUI</i> <sub>0</sub>	Average BUI for the fuel type	56	—	Table 4.6
<i>q</i>	Proportion of maximum rate of spread at BUI equal to 50	0.8	—	Table 4.6

※ ノバスコティア州作成の森林火災に関するガイド<sup>22)</sup>より設定

Table 5.4 森林火災の強度等の算出結果

	Rothermel の拡大方程式	FBP System
延焼速度 (Rate of spread)	3.38 [m min <sup>-1</sup> ]	2.54 [m min <sup>-1</sup> ]
火炎輻射強度 (Reaction intensity)	172 [kW m <sup>-2</sup> ]	160 [kW m <sup>-2</sup> ]
火線強度 (Fire intensity)	104 [kW m <sup>-1</sup> ]	204 [kW m <sup>-1</sup> ]
火炎長 (Flame length)	0.656 [m]	0.894 [m]
単位面積当たり熱量 (Low heat of combustion)	1840 [kJ m <sup>-2</sup> ]	4810 [kJ m <sup>-2</sup> ]
燃焼継続時間 (Residence time)	10.7 [s]	30 [s] <sup>*</sup>

※ FBP System は、火炎輻射強度が出力されないので、(49) 式を用いて燃焼継続時間及び単位面積当たり熱量から火炎輻射強度を概算する。計算に際して必要な燃焼継続時間については、Scott (2012)<sup>23)</sup>より 30s で設定した。(Scott (2012)<sup>23)</sup>の p.103 において、grass 等の燃料の場合の燃焼継続時間は 10s 程度、woody を含む燃料の場合の燃焼継続時間は 30s 程度に及ぶとの記載がある。FBP System は落葉だけでなく樹木も燃焼の対象としていることから、燃焼継続時間を 30s で設定した。)

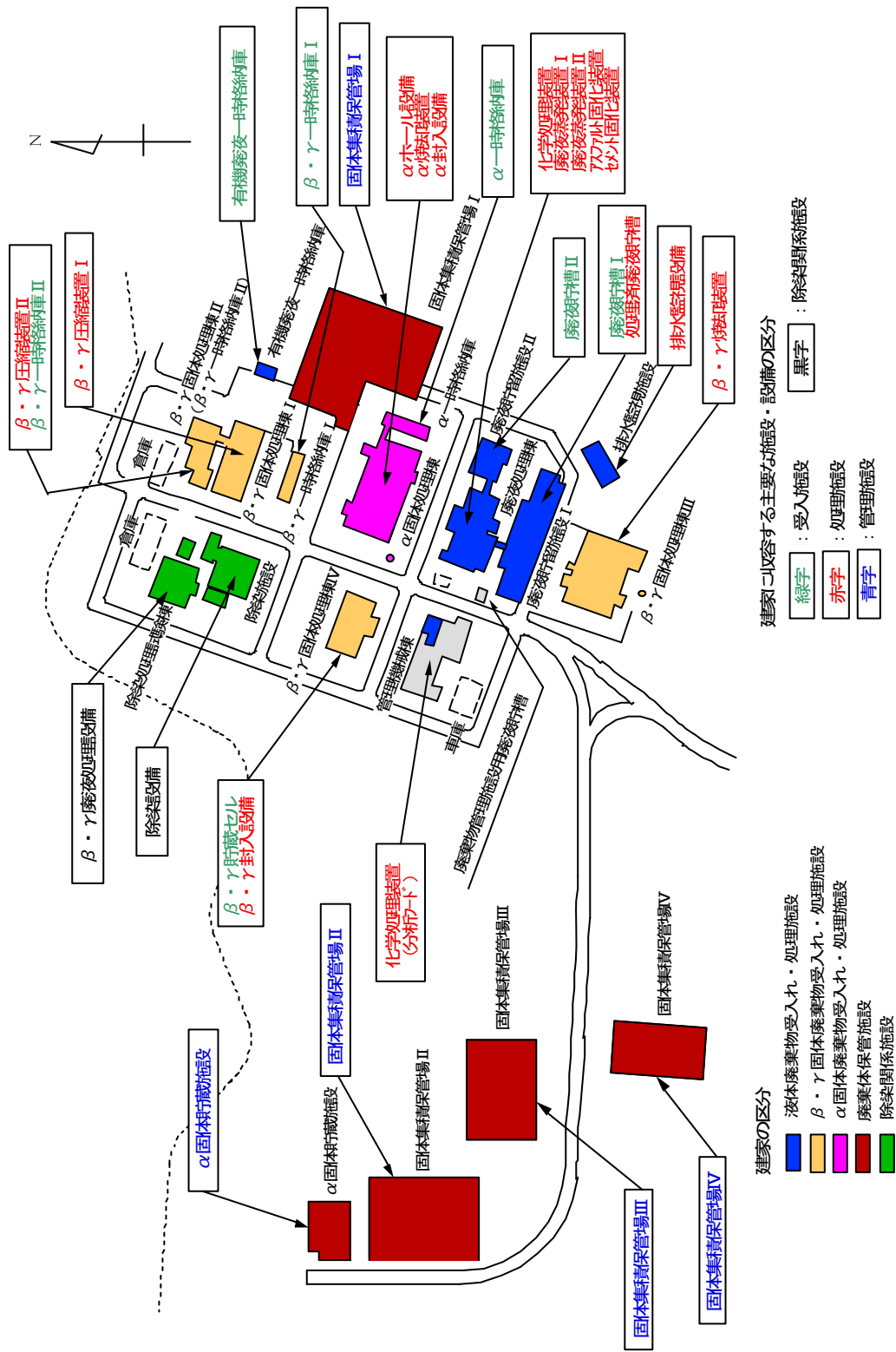
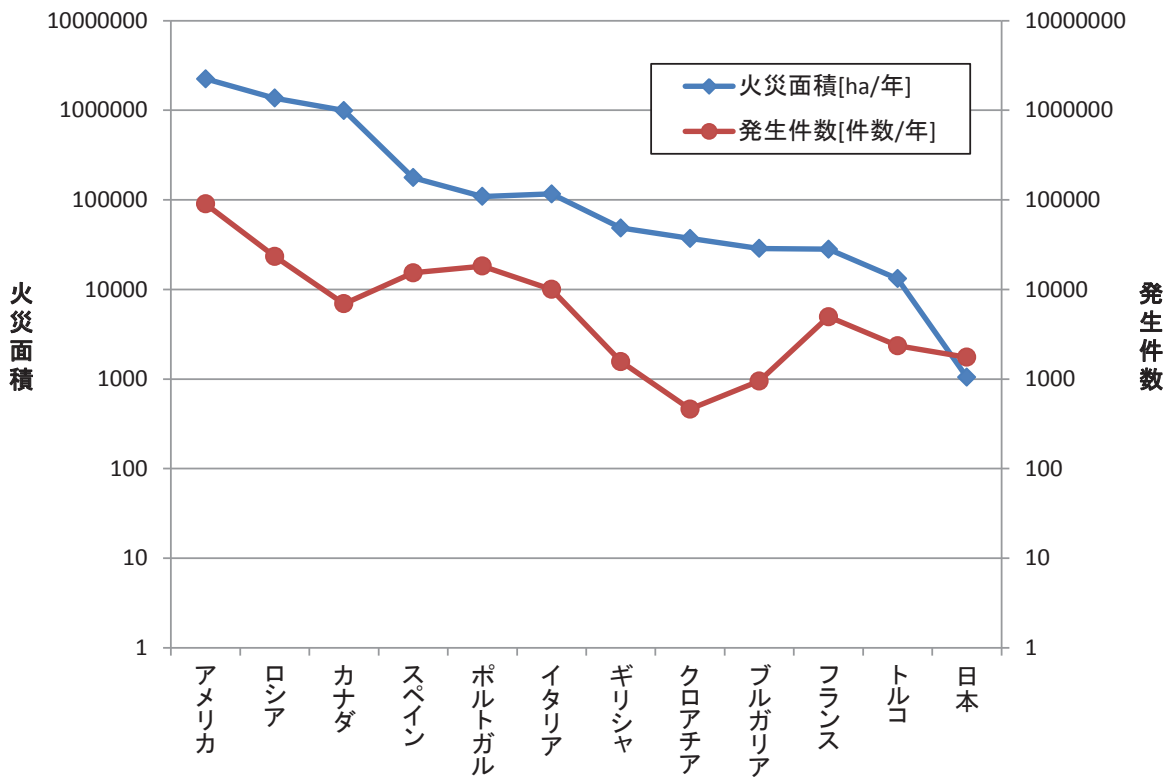


Fig.1.1 大洗研究開発センターにおける廃棄物管理施設の概要



出典：仏、伊、希、西、葡 \_\_Forest Fires in Europe 2009, EC Report No.10  
(1980~2009 平均) <sup>4)</sup>

日本 \_\_\_\_\_林野庁ホームページ (2009~2013 平均) <sup>5)</sup>

その他 \_\_\_\_\_国連 ECE レポート, FOREST FIRE STATISTICS  
(1999~2001 平均) <sup>3)</sup>

Fig.2.1 各国における年間森林火災面積及び発生件数  
(根岸 (2011) の文献 <sup>29)</sup>を基に作成)

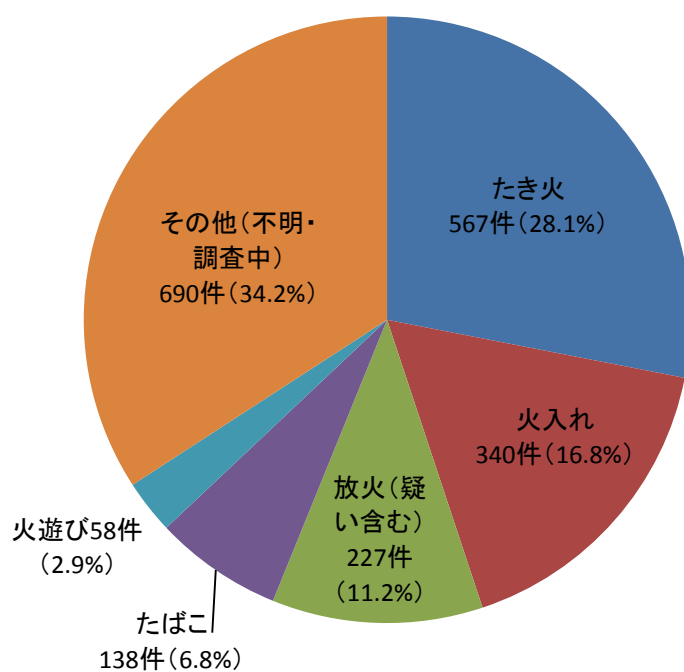


Fig.2.2 日本における森林火災の発生原因（平成 25 年中）<sup>6)</sup>



Fig.3.1 廃棄物管理施設周辺の地形（国土地理院の地図<sup>16)</sup>を加工して作成）

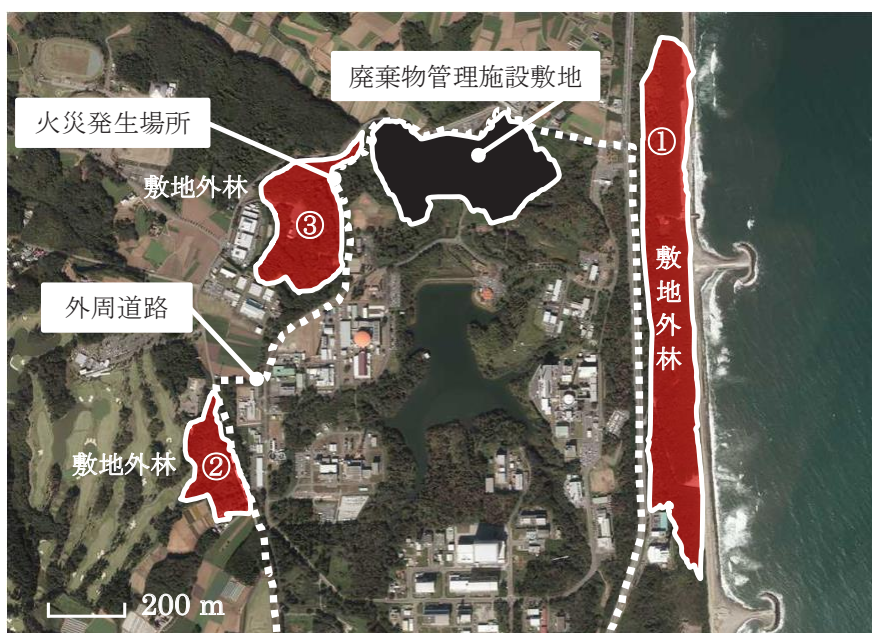


Fig.3.2 廃棄物管理施設周辺の上空写真（国土地理院の地図<sup>16)</sup>を加工して作成）

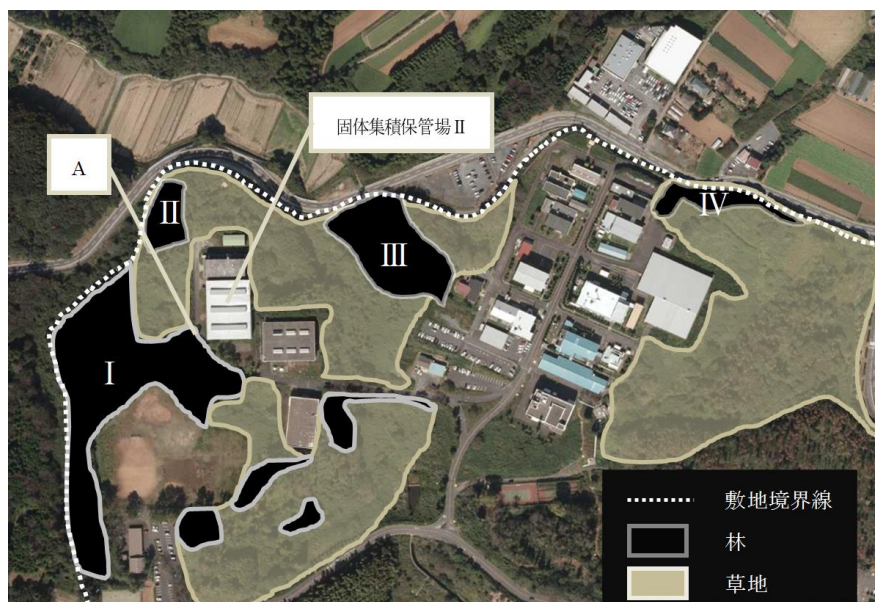


Fig.3.3 廃棄物管理施設の上空写真（国土地理院の地図<sup>16)</sup>を加工して作成）



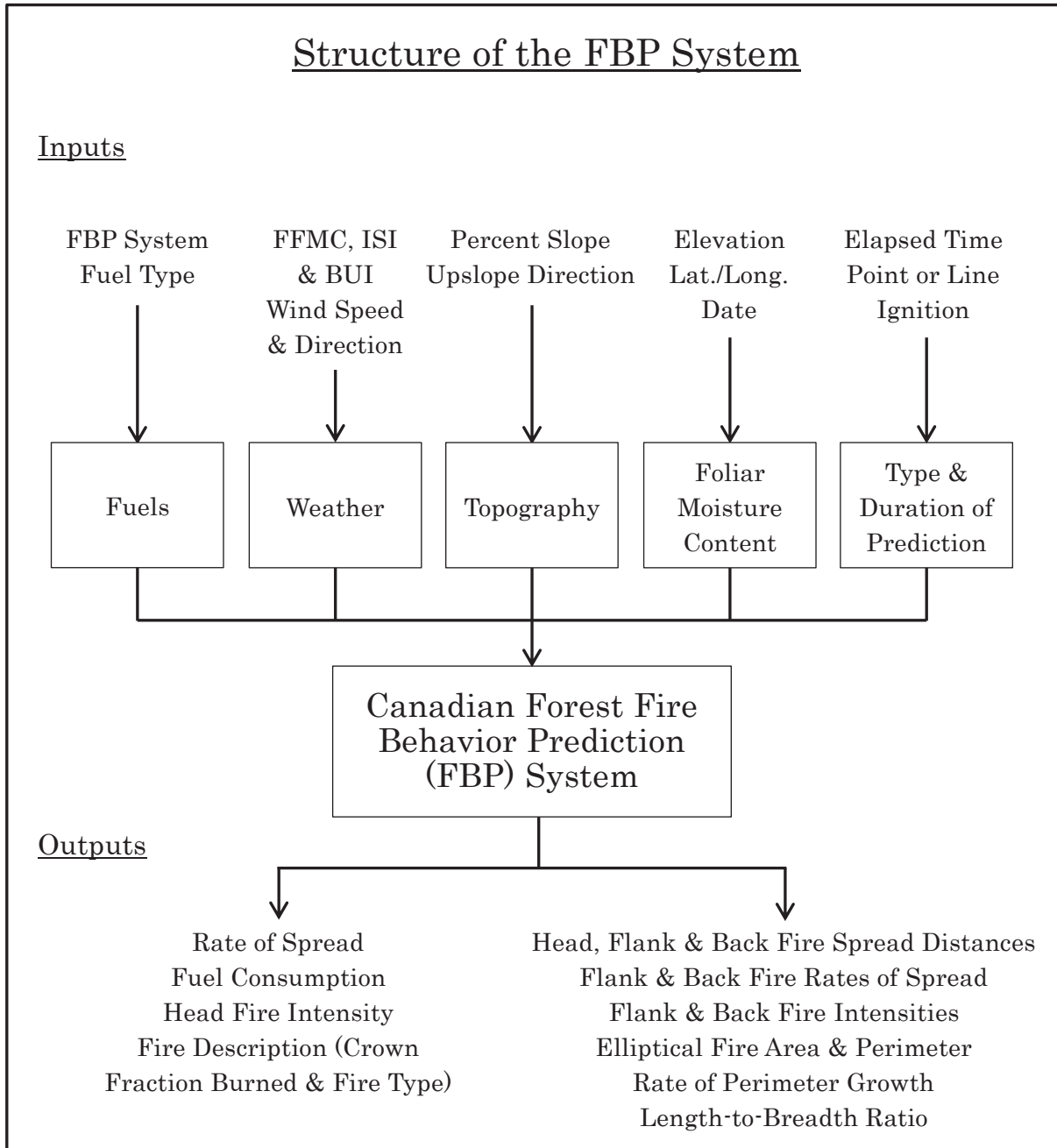


Fig.4.1 FBP System の構成 <sup>15)</sup>

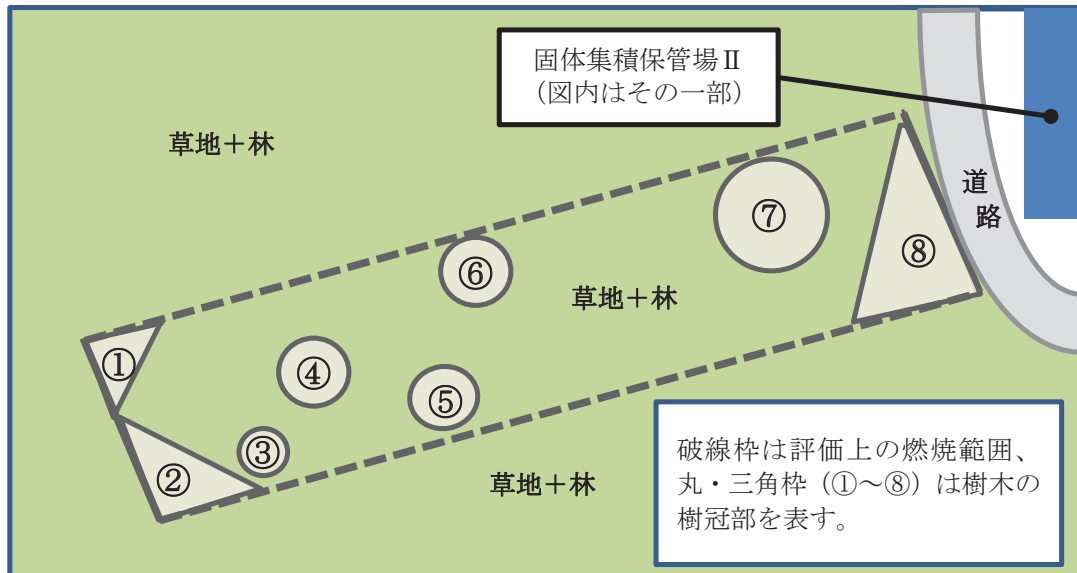


Fig.5.1 評価上の燃焼範囲と樹木の樹冠部に対する概略図

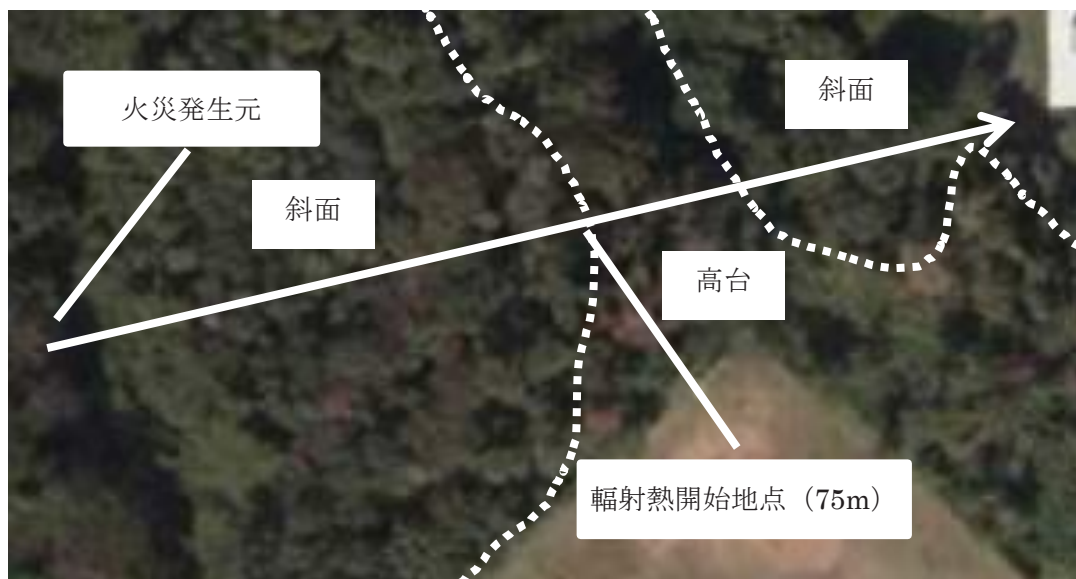


Fig.6.1 想定した火災発生元と廃棄物管理施設（固体集積保管場Ⅱ）までの上空写真（国土地理院の地図<sup>16)</sup>を加工して作成）



Fig.6.2 設定した火炎延焼距離（国土地理院の地図<sup>16)</sup>を加工して作成）

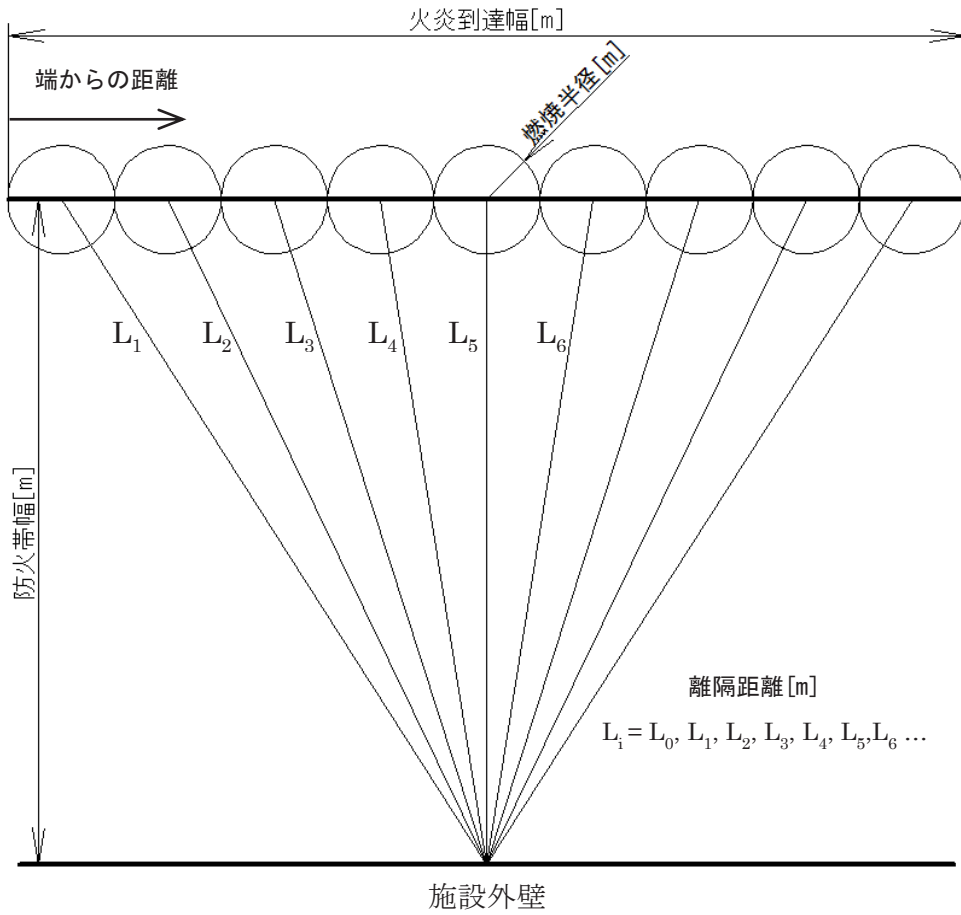


Fig.6.3 想定した円筒火炎モデルのモデル図

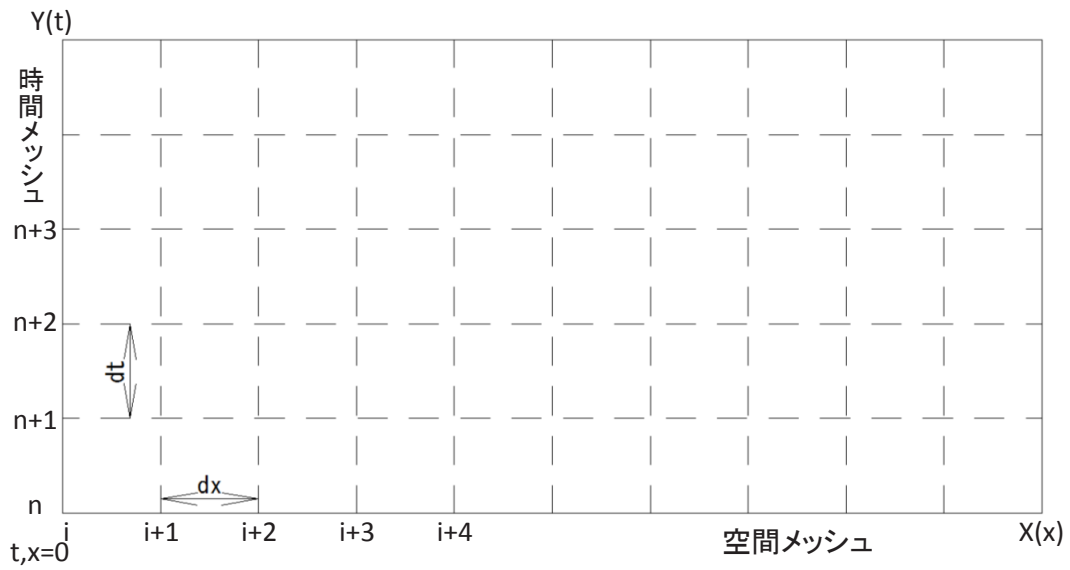


Fig.6.4 一次元熱伝導方程式の数値計算における距離及び時間軸の分割

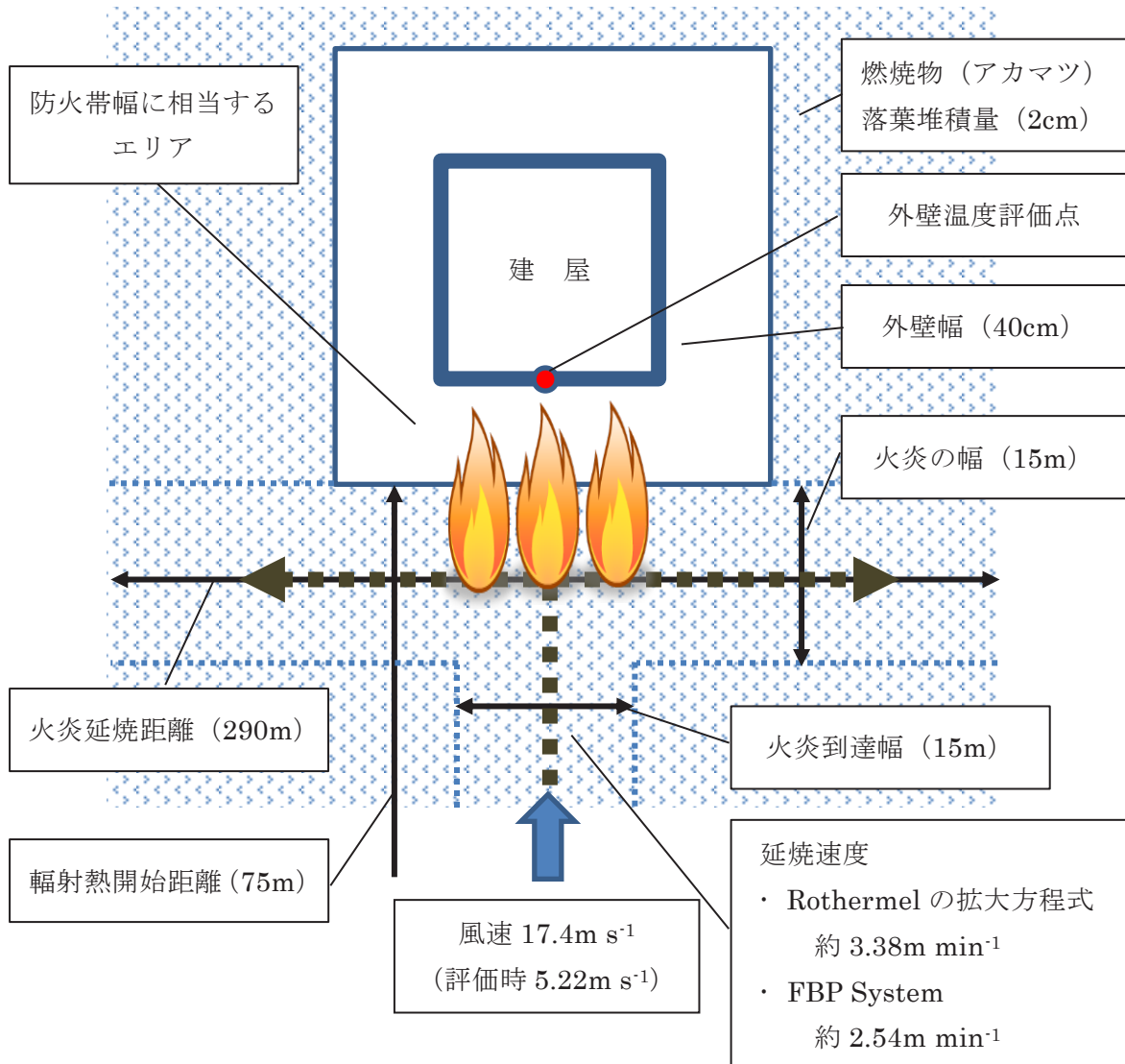


Fig.6.5 廃棄物管理施設に及ぼす森林火災の影響評価条件まとめ

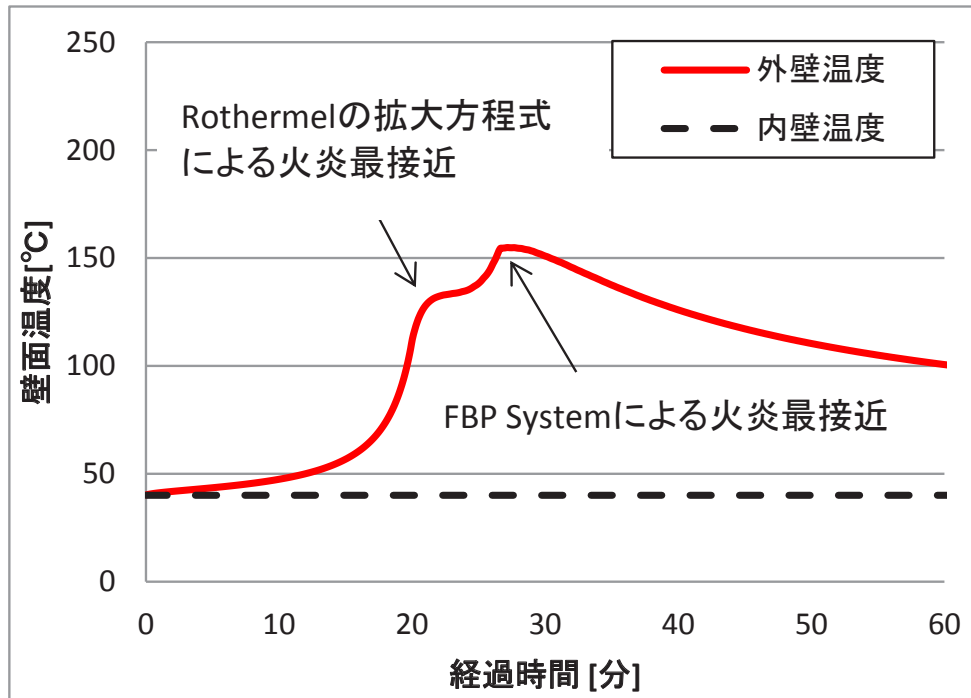


Fig.7.1 施設外壁温度の評価結果

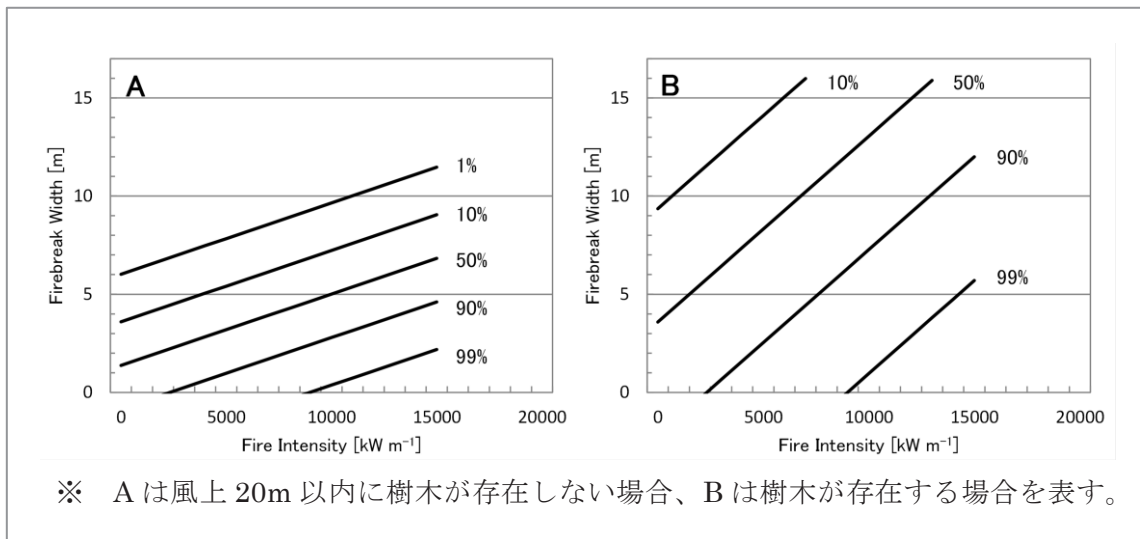


Fig.7.2 火線強度に対する防火帯の相関図 ((59)、(60)式より作成。)

## Appendix 1

## 1. 「McArthur の手法」の評価例

草の枯れ具合 (Grass Curing)、温度 (Temperature)、相対湿度 (Relative Humidity)、風速 (Wind Speed) 及び燃料重量 (Fuel Weight) を入力する事により、火災危険度インデックス、延焼速度及び燃料の含水率が出力される。そして、これら値から、Table A1.1 に示す評価結果読み取り表を用いて、時間経過における燃焼エリアの面積、火炎高さ等を計算する。

McArthur の手法はホームページ上で運用されており、以下の参照先より使用する事ができる。

参照先 URL ; <http://www.firebreak.com.au/grassmk5.html>

例として、Table A1.2 で設定した入力値に対する計算結果を Table A1.3 に記す。

## 2. 「Alexander and Fogarty の手法」の評価例

風速 (Wind Speed) を設定することにより、延焼速度 (ROS : Rate of Spread)、火線強度 (Fire Intensity)、火炎長 (Flame Length)、火災エリアの周長 (Fire Perimeter)、火災エリアの最大幅 (Max Breadth) 及び防火帯の最小幅 (Minimum Firebreak Width) を簡易的に評価することができる。Table A1.4 に「Alexander and Fogarty の手法」における風速と各パラメータの相関 (fire behavior pocket card<sup>14</sup>) より作成。) を示す。下段の表を用いて地表高さ 10m の風速から風力のレベルを決め、上段の表から延焼速度・火線強度等々を評価する。例として、風速を 1, 2, 5, 10 m s<sup>-1</sup> に設定した場合の評価結果を Table A1.5 に記す。

Table A1.1 評価結果読み取り表<sup>12)</sup>

FIRE DANGER INDEX	RATE OF SPREAD (km h <sup>-1</sup> )	DIFFICULTY OF SUPPRESSION	MAXIMUM AREA AT VARIOUS TIMES FROM START (ha)*				AVERAGE FINAL SIZE OF FIRE (ha)	FLAME HEIGHT (m) IN		
			1/2 h	1 h	2 h	4 h		Sparse Pasture	Average Pasture	Heavy Pasture
2	0.3	<b>Low.</b> Headfire stopped by road and tracks	3	20	80	320	3	0.3	1.0	3.0
5	0.6	<b>Moderate.</b> Head attack easy with water.	6	40	160	640	16	0.6	2.0	3.5
10	1.3	<b>High.</b> Head attack generally successful with water	15	90	360	1440	65	1.0	3.0	5.5
20	2.6	<b>Very High.</b> Head attack will generally succeed at this Index	35	210	840	3360	450	2.0	3.5	7.0
40	5.2	<b>Very High.</b> Head attack may fail except in favourable circumstances and close back burning to the head may be necessary	80	480	2000	8000	2400	2.5	5.0	9.0
50	6.4	<b>Extreme.</b> Direct attack will generally fail.	105	630	2500	10000	4000		5.5	10.0
70	9.0		170	1000	4000	16000	10000		6.0	11.0
100	12.8	Backburn from a secure good line with adequate manpower and equipment. Flanks must be held at all costs.	300	1800	7000	28000	32000		7.0	13.0

\*Note: This assumes that the head fire burns unchecked. suppression action which is only partially successful will reduce these areas.



Table A1.2 「McArthur の手法」における入力値（例）

草の枯れ具合%	温度 ℃	相対湿度 %	設定風速 km h <sup>-1</sup>	燃料重量 t ha <sup>-1</sup>
100	40	10	3.6 (1m s <sup>-1</sup> )	3.5
			7.2 (2m s <sup>-1</sup> )	
			18 (5m s <sup>-1</sup> )	
			36 (10m s <sup>-1</sup> )	

Table A1.3 「McArthur の手法」の評価値を補完した計算結果

設定風速 km h <sup>-1</sup>	火災危険度 インデックス	延焼速度 km h <sup>-1</sup>	燃料の含水率 %	最大燃焼エリア ha	最終平均燃焼エリア ha	火炎高さ m		
				1h	ha	粗密	標準	高密
3.6	10	1.36	2.92	90	65	1	3	5.5
7.2	12	1.57	2.92	114	142	1.2	3.1	5.8
18	19	2.42	2.92	198	412	1.9	3.5	6.9
36	38	5.00	2.92	453	2205	2.5	4.9	8.8

※ Table A1.3 に適合しない値については、インデックス数値間を単純比例で計算し値を補った。

Table A1.4 「Alexander and Fogarty の手法」における風速と各パラメータの相関  
(fire behavior pocket card<sup>14</sup>)より作成。)

A SIMPLE FIELD GUIDE FOR ESTIMATING THE BEHAVIOUR AND SUPPRESSION REQUIREMENTS OF FIRES DRIVEN BY WIND COMING FROM A CONSTANT DIRECTION, IN OPEN, FULLY CURED GRASSLANDS AT LOW FUEL MOISTURE.

Beaufort Wind Force	Forward spread distance/perimeter length/maximum breadth versus elapsed time since ignition				Head fire intensity --kW m <sup>-1</sup> --	Head fire flame length --metres--	Minimum firebreak width required to stop head fire	
	-----kilometers-----						----- metres-----	
	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h			Trees absent	Trees present
0-1	0.7/2.4/0.4	1.3/4.9/0.7	2.0/7.3/1.1	2.6/9.8/1.4	2300	2.7	5	12
2	1.0/2.7/0.4	2.0/5.5/0.7	2.9/8.2/1.1	3.9/10.9/1.5	3450	3.3	6	13
3	1.6/3.7/0.4	3.2/7.4/0.8	4.8/11.1/1.2	6.3/14.8/1.6	5550	4.1	7	15
4	2.7/5.7/0.6	5.3/11.5/1.1	8.0/17.2/1.7	10.7/22.9/2.2	9350	5.2	8	30+
5	4.4/9.1/0.8	8.7/18.2/1.5	13.1/27.3/2.3	17.5/36.4/3.1	15300	6.5	10	30+
6	6.1/12.5/1.0	12.2/25.0/1.9	18.2/37.5/2.9	24.3/50.0/3.8	21300	7.6	12	30+
7	7.2/14.8/1.0	14.5/29.5/2.0	21.7/44.3/3.1	28.9/59.1/4.1	25300	8.2	13	30+
8 & higher	7.5/15.2/1.0	15.0/30.5/2.1	22.5/45.7/3.1	30.0/60.9/4.1	26200+	8.4+	14+	30+

Beaufort Wind Scale for estimating 10 - m wind speed over land

Beaufort Wind Force	Descriptive Term	10 - m wind speed ---km h <sup>-1</sup> ---	Observed wind effects
0	Calm	< 1	Smoke rises vertically
1	Light air	1 to 5	Direction of wind shown by smoke drift but not by wind vanes.
2	Light breeze	6 to 11	Wind felt on face; leaves rustle; ordinary vanes moved by wind.
3	Gentle breeze	12 to 19	Leaves and small twigs in constant motion; wind extends light flags.
4	Moderate breeze	20 to 28	Wind raises dust and loose paper; small branches are moved.
5	Fresh breeze	29 to 38	Small trees in leaf begin to sway; crested wavelets form on inland waters.
6	Strong breeze	39 to 49	Large branches in motion; whistling heard in telephone wires; umbrellas used with difficulty.
7	Moderate gale	50 to 61	Whole trees in motion; inconvenience felt when walking against wind.
8	Fresh gale	62 to 74	Breaks twigs off trees; generally impedes progress.
9	Strong gale	75 to 88	Slight structural damage occurs (e.g., TV antennas and tiles blown off).
10	Whole gale	89 to 102	Seldom experienced inland; trees uprooted; considerable structural damage.

Table A1.5 「Alexander and Fogarty の手法」の任意の風速に対する評価結果

設定 風速 m s <sup>-1</sup>	風強さ	延焼 速度 km h <sup>-1</sup>	前線拡 大距離 km	楕円 全周 km	経過時 間最大 幅 km	前線火 線強度 kW m <sup>-1</sup>	前線 火炎長 m	防火帯幅*	
								m	
		1h							
1	1	1.3	1.3	4.9	0.7	2300	2.7	5	12
2	2	2.0	2.0	5.5	0.7	3450	3.3	6	13
5	3	3.2	3.2	7.4	0.8	5550	4.1	7	15
10	5	8.7	8.7	18.2	1.5	15300	6.5	10	30

※ 防火帯幅における樹木の有無は、風上 20m に樹木が有るか無いかを表している。

Appendix 2

1. 代表植生の選定

代表植生を選定するにあたり、その事前検討として Rothermel の拡大方程式による各植生の延焼速度等の比較を行った。Rothermel の拡大方程式への入力値は、植生データ以外同一の条件とした。比較する植生は、落葉広葉樹（28種）、常緑広葉樹（10種）、アカマツ、スギ及びヒノキであり、これら植生データは後藤らの文献<sup>17)</sup>を引用した。その他パラメータは、以下の通り設定した。Table A2.1 に設定した模擬入力値を記す。

Fig.A2.1 及び Fig.A2.2 に各植生における延焼速度と火炎輻射強度の比較結果を示す。図からもわかる通り、延焼速度・火炎輻射強度共にアカマツが最大となった。よって、より厳しい設定（安全側の設定）となるアカマツを代表植生として選定した。

Table A2.1 事前検討のために設定した Rothermel の拡大方程式の模擬入力値

パラメータ	単位	落葉 広葉樹 (28種)	常緑 広葉樹 (10種)	アカマツ	スギ	ヒノキ
$h$	$\text{kJ kg}^{-1}$	18524	18789	19958	20963	20467
$\rho_b$	$\text{kg m}^{-3}$	406.11	438.52	516.19	411.38	321.40
$\sigma$	$\text{cm}^{-1}$	149.48	74.94	70.44	60.51	32.79
$M_x$	—	0.25	0.20	0.31	0.32	0.28
$S_e$	—	0.049	0.040	0.024	0.046	0.032
$S_T$	—	0.072	0.062	0.031	0.060	0.043
$M_f$	—	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$\delta$	m	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$w_0$	$\text{kg m}^{-2}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\phi$	°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$U$	$\text{m s}^{-1}$	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

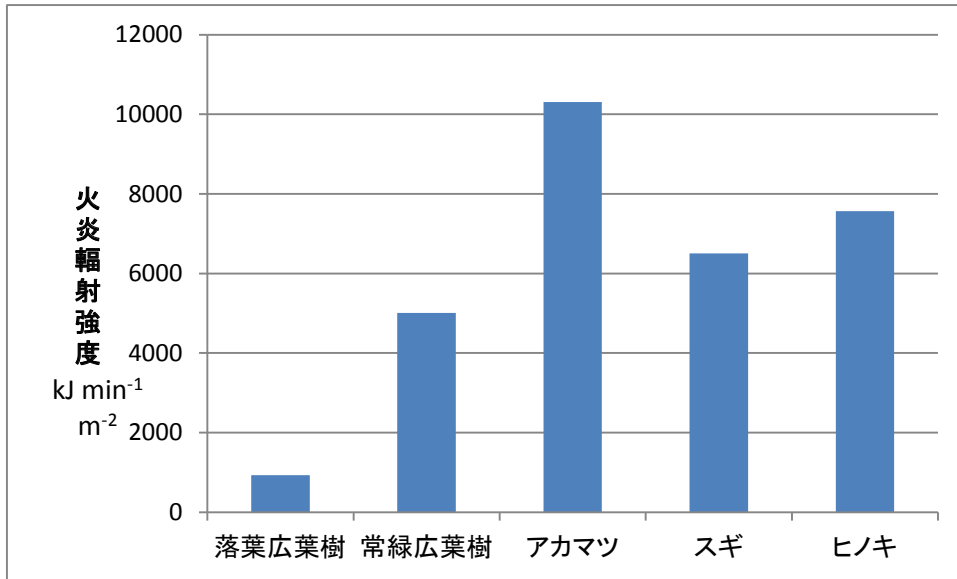


Fig.A2.1 Rothermel の拡大方程式における各植生の火炎輻射強度の比較

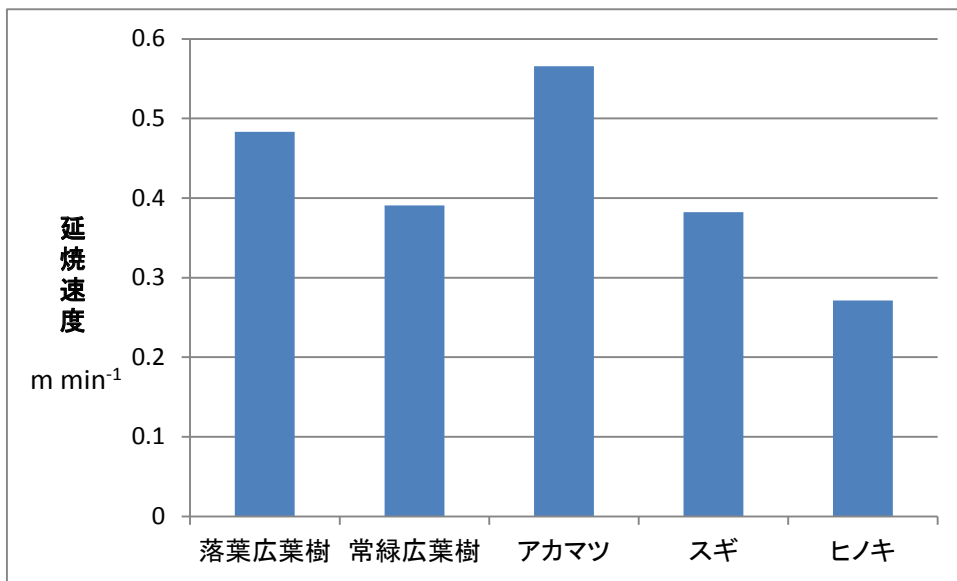


Fig.A2.2 Rothermel の拡大方程式における各植生の延焼速度の比較

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

