JAEA-Technology 2020-010 DOI:10.11484/jaea-technology-2020-010



高温工学試験研究炉における

C

航空機落下確率に関する評価

Assessment of the Probability of Aircraft Crashing for HTTR

小野 正人 塙 善雄 園部 博 西村 嵐 菅谷 直人 飯垣 和彦

Masato ONO, Yoshio HANAWA, Hiroshi SONOBE, Arashi NISHIMURA Naoto SUGAYA and Kazuhiko IIGAKI

高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 高温工学試験研究炉部 Department of HTTR HTGR Research and Development Center Oarai Research and Development Institute Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

September 2020

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2020

JAEA-Technology 2020-010

高温工学試験研究炉における航空機落下確率に関する評価

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター 高温工学試験研究炉部

小野 正人、塙 善雄+、園部 博+、西村 嵐+、菅谷 直人+、飯垣 和彦

(2020年7月1日受理)

平成25年12月18日に施行された「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の 基準に関する規則」の適合性確認のために、高温工学試験研究炉における航空機落下確率を評価 した。評価は、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」を参考にして、 原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家及び冷却塔を標的として実施した。その結果、落下確率は5.98 ×10⁻⁸(回/年)であり、基準である10⁻⁷(回/炉・年)を下回り、防護設計が不要であることを確認し た。さらに、落下確率の大きい事故については、事故件数の増加を仮定して評価を行い、評価基準 に対する裕度を確認した。

大洗研究所:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

+ 環境技術開発センター 材料試験炉部

JAEA-Technology 2020-010

Assessment of the Probability of Aircraft Crashing for HTTR

Masato ONO, Yoshio HANAWA⁺, Hiroshi SONOBE⁺, Arashi NISHIMURA⁺, Naoto SUGAYA⁺ and Kazuhiko IIGAKI

Department of HTTR, HTGR Research and Development Center, Oarai Research and Development Institute, Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 1, 2020)

In response to new standard for regulating research and test reactor which is enforced December 18, 2013, it was carried out assessment of the probability of aircraft crashing for HTTR. According to assessment method provided in the "Assessment Criteria of the Probability of Aircraft Crashing on Commercial Power Reactor Facilities", assessment was conducted targeting reactor building, spent fuel storage building and cooling tower. As a result, it was confirmed that the probability was 5.98×10^{-8} , which is lower than the assessment criteria 10^{-7} .

Keywords : HTTR, New Regulatory Standard, Probability of Aircraft Crashing

+ Department of JMTR, Waste Management and Decommissioning Technology Development Center

目 次

1. 序論1	
2. 許可基準規則と評価対象事故の選定1	-
2.1 許可基準規則における要求事項1	-
2.2 要求事項に対する基本的な考え方2	2
2.3 評価対象事故2)
3. 航空機落下確率の計算手法とパラメータ	3
3.1 計器飛行方式民間航空機の飛行場での離着陸時における落下事故	}
3.2 計器飛行方式民間航空機の航空路を巡行中の落下事故	F
3.3 有視界飛行方式民間航空機の落下事故	;
3.4 自衛隊機又は米軍機の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行中の落下事故5)
3.5 自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故	;
3.6 計算結果	;
4. 事故件数の増加を仮定した評価	7
4.1 有視界飛行方式民間航空機の落下事故の増加を仮定した評価	7
4.2 自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故の増加を仮定した評価8	3
4.3 結果及び考察	3
5. 結論	3
謝辞c)
参考文献)

Contents

1. Int	roduction1
2. Ne	w Standard and Evaluation Accidents1
2.1	Requirement of New Standard1
2.2	Basic Approach2
2.3	Evaluation Accidents2
3. As	sessment of the Probability of Aircraft Crashing
3.1	Aircraft Accidents of Commercial Aircrafts for Instrument Flight Rule
	at Takeoff and Landing
3.2	Accidents of Commercial Aircrafts for Instrument Flight Rule at Air Route4
3.3	Accidents of Commercial Aircrafts for Visual Flight Rules5
3.4	Accidents of Self Defense Forces Aircrafts or U.S. Aircrafts During
	Training Area and Outside Training Area5
3.5	Accidents of Self Defense Forces Aircrafts or U.S. Aircrafts Between
	Base and Training Area
3.6	Result6
4. Ev	aluation Assuming Increase of Accidents
4.1	Evaluation Assuming Increase of Accidents of Commercial Aircrafts
	for Visual Flight Rules
4.2	Evaluation Assuming Increase of Accidents of Self Defense Forces
	Aircrafts or U.S. Aircrafts Between Base and Training Area
4.3	Result and Discussion
5. Co	onclusion
Ackno	owledgement
Refere	ences9

1. 序論

日本原子力研究開発機構の HTTR(高温工学試験研究炉:High Temperature Engineering Test Reactor)は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化を目的として大洗研究所に建設された日本 初の高温ガス炉である⁽¹⁾。

HTTRでは、運転再開に向けて平成25年12月18日に施行された「試験研究の用に供する原子 炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(以下、「許可基準規則」という。)⁽²⁾の第6条「外 部からの衝撃による損傷の防止」第3項及び解釈第8項の適合性確認のために、航空機落下確率 を評価した。評価の判断基準は、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準 について」⁽³⁾(以下、「評価基準」という。)に基づき10⁻⁷(回/炉・年)として、防護設計の要否を判断 した。

HTTR では、これまでに平成 14 年 12 月に HTTR 原子炉施設への航空機落下確率を評価した。 しかしながら、当時から航空機に係るデータが大きく変わったこと、評価の基となる評価基準⁽³⁾が改正 されたこと等を受けて、再評価を実施する必要があった。また、将来において事故件数が増加しても 落下確率が評価基準を満足することを確認するために、評価対象事故のうち落下確率が大きい事 故に対しては、事故件数の増加を仮定して評価を行った。

本報告書は、これらの評価結果をまとめたものである。

2. 許可基準規則と評価対象事故の選定

2.1 許可基準規則における要求事項

許可基準規則及びその解釈の第6条において、以下の要求事項がある⁽²⁾。

(1) 第6条第3項(外部からの衝撃による損傷の防止)

安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される試験研究用等原子炉施設の安全性を損 なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの(故意によるものを除く。)に対して安全 機能を損なわないものでなければならない。

(2)解釈 第6条第8項

第3項に規定する「試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象で あって人為によるもの(故意によるものを除く。)」とは、敷地及び敷地周辺の状況をもとに選択されるも のであり、飛来物(航空機落下等)、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、 電磁的障害等をいう、なお、上記の「航空機落下」については、「実用発電用原子炉施設への航空機 落下確率の評価基準について」(平成14・07・29原院第4号(平成14年7月30日原子力安全・保安 院制定))等に基づき、防護設計の要否について確認する。 2.2 要求事項に対する基本的な考え方

要求事項のうち、飛来物(航空機落下等)に適合していることを確認するために、航空機落下確率を 評価し、航空機落下に対する防護設計の要否を確認した。評価の判断基準は、評価基準⁽³⁾に基づ き落下確率が 10⁻⁷(回/炉・年)を超えないこととした。

評価は評価基準⁽³⁾に基づき実施する。詳細な評価手法及び評価に用いるパラメータは、3 章に記載する。標的面積は、評価基準⁽³⁾に基づき、炉心や使用済燃料貯蔵プールを保護すること及び原子 炉を安全停止することの観点から、原子炉建家、使用済燃料貯蔵建家及び冷却塔の合算の面積とした。原子炉施設の全体配置図を図1に、標的面積を図2に示す。

評価に用いるデータは、「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子 力安全基盤機構)⁽⁴⁾、「空港管理状況調書」(国土交通省 航空局)、Japan Aeronautical Information Service Center^(5,6)とした。

2.3 評価対象事故

評価基準(3)に基づき、以下の5つの事故に対して評価の必要性を検討した。

- 1) 計器飛行方式民間航空機の落下事故
 - ① 飛行場での離着陸時における落下事故
 - ② 航空路を巡行中の落下事故
- 2) 有視界飛行方式民間航空機の落下事故
- 3) 自衛隊機又は米軍機の落下事故
 - 訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行中の落下事故
 - ② 基地-訓練空域間を往復時の落下事故

評価の必要性を以下のとおり検討した。

1)の①は、HTTR 原子炉施設は茨城空港(百里基地)から約 15km の距離にあり最大離着陸地点 30 ノーティカル・マイル(NM)(約 55.56km)までの距離に存在すること及び HTTR 原子炉施設は飛行 場の滑走路端から滑走路方向に対して±60°の扇型区域内に設置されていることから評価対象とした。 空港から最大離着陸地点までの距離を図 3⁽⁵⁾に示す。

1)の②は、航空路が HTTR 原子炉施設の上空に存在することから評価対象とした。

2)は、有視界飛行方式により飛行する民間の多くの航空機が不定期便であり、特定の飛行ルート が存在せず、また、飛行の頻度も一定でないことから、これらの航空機が陸上に落下する確率を全国 平均値として評価対象とした。

3)の①は、HTTR 原子炉施設上空には自衛隊、米軍機の訓練空域はないが、太平洋沖の上空に は自衛隊及び米軍機の訓練空域があることから、評価基準⁽³⁾に基づき原子炉施設上空に訓練空域が 存在しない場合を評価対象とした。原子炉施設から訓練空域までの飛行範囲を図 4⁽⁶⁾に示す。

3) の②は、以下を踏まえて自衛隊機のみを評価対象とした。

・ HTTR 原子炉施設は自衛隊機又は米軍機の基地ー訓練空域間の往復の想定飛行範囲内に 位置していること。基地ー訓練空域間を往復時の落下事故の対象は、百里基地と訓練空域間 を往復する自衛隊機のみであること。

- ・自衛隊機の訓練空域までの想定飛行範囲は、百里基地、入間基地及び厚木基地が考えられるが、入間基地は戦闘機を保有せず輸送機が中心であり、厚木基地は海上自衛隊の使用基地で海上の保護、監視、民生協力(災害派遣等)、航空救難が中心であるため、入間基地及び厚木基地から飛来する想定を除外し、百里基地からの飛行範囲を想定した。
- ・米軍機の訓練空域までの想定飛行範囲は、横田基地及び厚木基地から飛来する範囲が考えられるが、横田基地は西太平洋地域における空輸の輸送機であること、厚木基地は陸軍が駐留し米海軍航空部隊航空機の整備、補給、支援業務を行っており、原則、訓練空域に向かう航空機がないことから、横田基地及び厚木基地からの飛来は除外した。
- 以上の検討により、上記の5つの事故全てを評価対象とした。

3. 航空機落下確率の計算手法とパラメータ

3.1 計器飛行方式民間航空機の飛行場での離着陸時における落下事故 飛行場での離着陸時における落下事故の確率は、(1)式で算出した⁽³⁾。

$$P_{d,a} = f_{d,a} \cdot N_{d,a} \cdot A \cdot \Phi_{d,a} \left(r, \theta \right) \tag{1}$$

$P_{d,a}$:対象施設への離着陸時の航空機落下確率	(回/年)
f _{d,a}	:対象航空機の国内での離着陸時事故率(D _{d,a} /E _{d,a})	(-)
$D_{d,a}$:国内での離着陸時事故件数	(回)
$E_{d,a}$:国内での離着陸回数	(回)
N _{d,a}	:当該飛行場での対象航空機の年間離着陸回数	(回/年)
А	:原子炉施設の標的面積	(km^2)
$arPsi_{d,a}(r, heta)$:離着陸時の事故における落下地点確率分布関数	$(/km^2)$

ここで、各パラメータは以下を採用した。なお、標的面積は、離着陸時の航空機の突入角度を考慮して対象建家の投影面積とした。

- ・*D_{d,a}*:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構)により、4(回)とした。
- ・ *E_{d,a}*:「航空輸送統計年報 第 1 表 総括表」及び「空港管理状況調書」(国土交通省 航空局)
 により、32,780,942(回)とした。
- ・ $f_{d,a}: D_{d,a}/E_{d,a}$ であるため、 1.22×10^{-7} とした。
- *N_{d,a}*:「暦年・年度別航空管理状況調書」(百里(共用))(国土交通省 航空局)により、4,202
 (回/年)とした。
- ・A:離着陸時の航空機の突入角度を考慮して対象建家の投影面積とするため、0.00478(km²) とした。

- ・ *Φ_{d,a}(r, θ)*:「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準について」⁽³⁾に より、1.55×10⁻⁴(/km²)(一様分布)とした。
- 3.2 計器飛行方式民間航空機の航空路を巡行中の落下事故 航空路を巡航中の落下事故の確率は、式(2)で算出する⁽³⁾。

$$P_c = \frac{f_c \cdot N_c \cdot A}{W} \tag{2}$$

P_c	:対象施設への巡航中の航空機落下確率	(回/年)
f_c	:単位飛行距離当たりの巡航中の落下事故率(G_/H_)	(回/(飛行回・km))
G_c	:巡行中事故件数	(回)
H_c	:延べ飛行距離	(飛行回・km)
N_c	:評価対象とする航空路等の年間飛行回数	(回)
A	:原子炉施設の標的面積	(km^2)
W	:航空路幅	(km)

ここで、各パラメータを以下に示す。なお、標的面積は、対象建家の水平断面積とする。

- ・ G_c:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) によると平成4年から平成23年までの20年間の巡航中の事故件数は0件であるが、保守 的に20年間で0.5件とした。
- ・*H*_c: 延べ飛行距離は国土交通省 航空局「航空輸送統計年報 第 1 表 総括表」及び「空港 管理状況調書」により、10,132,601,674(飛行回・km)とした。
- ・ $f_c: G_c/H_c$ であるため、4.93×10⁻¹¹(回/(飛行回・km))とした。
- N_c:エンルートチャート(2013年3月7日)及び国土交通省航空局への問い合わせにより確認した。その結果、航空路R211、直行経路(IXE-SWAMP)及びRNAV経路(Y30及びY108)の航空交通量のピークデーは平成24年9月19日であり、当日の航空交通量のデータを用いる。航空路R211及び直行経路(IXE-SWAMP)については、20年間の巡航中の飛行回数は0回であるが保守的に1回(航空路R11を0.5回及び直行経路(IXE-SWANP)0.5回の和)を365倍して、365(回)とした。RNAV経路(Y30及びY108)については、問い合わせた結果101回を365倍して、36,865(回)とした。なお、ピークデーの交通量を年間の交通量に換算するため、365を乗じた。
- ・A:対象建家の水平断面積とするため、0.00374(km²)とした。
- W:エンルートチャート(2013 年 3 月 7 日)及び国土交通省航空局への問い合わせにより確認した。その結果、航空路 R211 及び直行経路(IXE-SWAMP)は 14.816km(8NM)であり、 RNAV 経路(Y30 及び Y108)は18.520km(10NM)であった。

3.3 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

有視界飛行方式民間航空機の落下事故の確率は、式(3)で算出する(3)。

$$P_{\nu} = \frac{f_{\nu}}{S_{\nu}} \left(A \cdot \alpha \right) \tag{3}$$

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確率	(回/年)
S_v	:全国土面積	(km^2)
A	:原子炉施設の標的面積	(km^2)
α	:対象航空機の機種による係数	(-)

ここで、各パラメータを以下に示す。なお、標的面積は、対象建家の水平断面積とする。

- ・f:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) により確認した。その結果、大型固定翼機については、20 年間の落下事故件数は 0 回であ るが保守的に 0.5 回として計算し、0.025(0.5/20) (回/年)とした。小型固定翼機については、 1.75(35/20) (回/年)とした。大型回転翼機については、0.05(1/20) (回/年)とした。小型回 転翼機については、1.25(25/20) (回/年)とした。
- ・ S_v:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) により、372,000 (km²)とした。
- ・A:対象建家の水平断面積とするため、0.00374(km²)とした。
- ・大型機の a:評価基準⁽³⁾により、1 とした。
- ・小型機の α :保守的に1とした。

3.4 自衛隊機又は米軍機の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行中の落下事故

訓練空域外を飛行中の落下事故(原子炉施設上空に訓練空域が存在しない場合)の確率は、式(4) で算出する⁽³⁾。

$$P_{so} = \left(\frac{f_{so}}{S_o}\right) \cdot A \tag{4}$$

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確率	(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	(km^2)
A	:原子炉施設の標的面積	(km^2)

ここで、各パラメータを以下に示す。なお、標的面積は、対象建家の水平断面積とする。

- ・f_{so}:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) により、自衛隊機を 0.4(8/20) (回/年)、米軍機を 0.25(5/20) (回/年)とした。
- ・ S_o:「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) により、自衛隊機を 295,000(km²)、米軍機を 372,000(km²)とした。
- ・A:対象建家の水平断面積とするため、0.00374(km²)とした。

3.5 自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故

基地-訓練空域を往復時の落下事故(想定飛行範囲内に原子炉施設が存在する場合)の確率は、 式(5)で算出する⁽³⁾。

$$P_{se} = \left(\frac{f_{se}}{S_{se}}\right) \cdot A \tag{5}$$

P_{se}	:対象施設への航空機落下確率	(回/年)
f_{se}	:単位年当たりの訓練空域外落下事故確率	(回/年)
S_{se}	:想定飛行範囲の面積	(km^2)
A	:原子炉施設の標的面積	(km^2)

ここで、各パラメータを以下に示す。なお、標的面積は、対象建家の水平断面積とする。

- ・ f_{se}: 「JNES-RE-2013-9011 航空機落下事故に関するデータの整備」(原子力安全基盤機構) によると当該想定飛行範囲内で 20 年間の落下事故件数は 0 件であるが、保守的に 20 年間 で 0.5 件として計算した。
- ・ S_{se}は、百里基地(飛行場)と自衛隊機の訓練空域(Area1,Area E^[E-1,E-2,E-3,E-4]の全域)
 境界間を直線で結んだ想定飛行範囲の面積(米軍の訓練空域(R-121)を除く)であるため、
 4,541(km²)とした。
- ・Aは、対象建家の水平断面積とするため、0.00374(km²)とした。

3.6 計算結果

3.1 節から3.5 節の落下確率の計算結果及び合計を以下に示す。

- (1) 3.1 節の計器飛行方式民間航空機の落下事故の飛行場での離着陸時における落下事故の落下確率は、3.79×10⁻¹⁰(回/年)となった。
- (2) 3.2 節の計器飛行方式民間航空機の落下事故の航空路を巡航中の落下事故の落下確率 は、3.72×10⁻¹⁰(回/年)となった。
- (3) 3.3 節の有視界飛行方式民間航空機の落下事故の落下確率は、3.09×10⁻⁸(回/年)となった。

- (4) 3.4 節の自衛隊又は米軍機の落下事故の訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行 中の落下事故の落下確率は、7.58×10⁻⁹(回/年)となった。
- (5) 3.5 節の自衛隊又は米軍機の落下事故の基地-訓練空域間を往復時の落下事故の落下 確率は、2.06×10⁻⁸(回/年)となった。
- (6) (1)~(5)の落下確率の合計は、5.98×10⁻⁸(回/年)となり、基準である 10⁻⁷(回/炉・年)を下回るため、防護設計が不要であることが確認できた。航空機落下確率の評価結果を表1に示す。

4. 事故件数の増加を仮定した評価

将来において事故件数が増加しても落下確率が評価基準を満足することを確認するために、評価 対象事故のうち落下確率が大きい事故に対して、事故件数の増加を仮定して評価を行った。落下確 率が大きい事故は、「有視界飛行方式民間航空機の落下事故」及び「自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故」であり、それぞれ、落下確率が 3.09×10⁻⁸(回/年)及び 2.06×10⁻⁸ (回/年)で、全体の確率の約52%及び約34%を占める。これらの事故は、全体の約9割を占めるため、 事故の増減は評価結果に大きな影響を与える。このため、これらの事故が増えた場合の感度解析を 行った。

4.1 有視界飛行方式民間航空機の落下事故の増加を仮定した評価

本事故の落下確率のうち小型機の落下確率は、小型機の係数を1としたこと及び小型機の落下 事故の件数は全61.5件中60件と多いことから、評価結果に与える影響が大きい。本検討では、小型 機の事故件数が10%増加したと仮定して評価を実施した。評価に用いたパラメータを以下に示す。なお、 上記計算との相違を明確にするため括弧内に上記計算のパラメータ値を示す。

$$P_{V} = \frac{f_{v}}{S_{v}} \left(A \cdot \alpha \right) \tag{3}$$

f_{V}	:0.025 (0.5/20)	(変更なし)	大型固定翼機(回/年)
	1.95 (39/20)	(← 1.75 (35/20))	小型固定翼機(回/年)
	0.05 (1/20)	(変更なし)	大型回転翼機(回/年)
	1.40 (28/20)	$(\leftarrow 1.25 (25/20))$	小型回転翼機(回/年)
S_{v}	:372,000		全国土面積(km ²)
A	:0.00374		原子炉施設の標的面積(km ²)
α	:1	大型	型固定翼機、大型回転翼機(-)
	1	小型	型固定翼機、小型回転翼機(-)

4.2 自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故の増加を仮定した評価

本事故の落下確率は、20年間で発生した件数が0件であるが、保守的に20年間で0.5件として 計算した。本検討では、落下事故の件数を20年間で1件と仮定して評価した。評価に用いたパラメ ータを以下に示す。なお、上記計算との相違を明確にするために、括弧内に上記計算のパラメータ値 を示す。

$$P_{se} = \left(\frac{f_{se}}{S_{se}}\right) \cdot A \tag{5}$$

 f_{se} :0.05 (1/20) (\leftarrow 0.025 (0.5/20)) 単位年当たりの訓練空域外落下事故確率($\Box/$ 年) S_{se} :4,541想定飛行範囲の面積 (km²)A:0.00374原子炉施設の標的 (km²)

4.3 結果及び考察

4.1 節及び 4.2 節の落下確率の計算結果及び合計を以下に示す。

- (1) 4.1 節の「有視界飛行方式民間航空機の落下事故」の小型機の事故件数を10%増加して評価を実施し、確率は3.09×10⁻⁸(回/年)から3.44×10⁻⁸(回/年)となった。
- (2) 4.2 節の「自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故」の事故件数を 20
 年間で1件として評価し、確率は 2.06×10⁻⁸(回/年)から 4.12×10⁻⁸(回/年)となった。
- (3) 上記の想定で事故件数が増加した場合の落下確率の合計は8.40×10-8(回/年)となった。

4.1 節の「有視界飛行方式民間航空機の落下事故」の確率は、落下事故が7件増加すると3.50× 10⁻⁹(回/年)増加し、一方、4.2 節の「自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故」 の確率は、落下事故が0.5件増加すると2.06×10⁻⁸(回/年)増加した。後者の確率は、事故件数0.5 件のみの増加であるが大きく増加した。その理由は、前者の確率の算出では事故件数を全国土面 積(372,000km²)で除することに対して、後者の確率の算出では事故件数を想定飛行範囲の面積 (4,541km²)で除することによるものと考えられる。これらの面積比は約82倍となり、後者の落下事故 が発生すると確率が大きく増加するため、今後パラメータの変化に注視する必要がある。評価結果を表 2に示す。

5. 結論

新たに施行された許可基準規則の適合性確認のために、航空機落下確率を評価し、航空機落 下に対する防護設計の要否を判断した。評価の結果、5つの落下事故の確率の合計は 5.98×10⁻⁸ (回/年)であり、基準である10⁻⁷(回/炉・年)を下回るため、防護設計が不要であることを確認した。ま た、落下確率が大きい事故に対して、事故件数の増加を仮定して評価した結果、落下確率の合計は 8.40×10⁻⁸(回/年)であり、基準である10⁻⁷(回/炉・年)を下回るため、防護設計が不要となることも確認 できた。なお、「自衛隊機又は米軍機の基地-訓練空域間を往復時の落下事故」は、落下事故が発生 すると確率が大きく増加するため、今後パラメータの変化に注視する必要がある。

今後、航空機落下確率が大幅に上昇するような評価データが更新された場合は、現実的な評価を 行うべきである。具体的には、「有視界飛行方式民間航空機の落下事故」の小型機の係数を、HTTR 原子炉施設の堅固性を評価することで、見直すことが可能である。

謝辞

本評価を行うにあたり、楠 剛 自然現象等評価ワーキンググループリーダー、前田茂貴 同グルー プサブリーダー、七種明雄 同グループサブリーダーに御指導、御助言頂きました。ここに記して深く感 謝の意を表します。

参考文献

- S. Saito et al.: "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", JAERI-1332 (1994), 247p.
- (2) 原子力規制委員会,試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈, http://www.nsr.go.jp/data/000172364.pdf,(参照:2020年6月26日).
- (3) 経済産業省原子力安全・保安院,実用発電用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), https://www.nsr.go.jp/data/000126300.pdf(参照:2020年6月26日).
- (4) 原子力安全基盤機構,航空機落下事故に関するデータの整備, JNES-RE-2013-9011, 2013, 79p.
- (5) Japan Aeronautical Information Service Center(国土交通省 航空局), RJAH-AD2-24.15 INSTRUMENT APPROACH CHART, https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/DomesticAIP.do(参照日:2014年3月3日).
- (6) Japan Aeronautical Information Service Center(国土交通省 航空局), ENROUTE CHART, https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/DomesticAIP.do(参照日:2014年3月3日).

1. 計器飛行方式 民間航空機の落	 ①飛行場での離着陸時における落下 事故 	P _{d,a}	$3.79 imes 10^{-10} (0.6\%)^{st}$
下事故	②航空路を巡航中の落下事故	Pc	$3.72 \times 10^{-10} (0.6\%)^{*}$
2. 有視界飛行方式民間航空機の落下事故 Pv		$3.09 \times 10^{-8} (51.7\%)^{**}$	
 3. 自衛隊又は米 軍機の落下事故 	①訓練空域内を訓練中及び訓練空域 周辺を飛行中の落下事故	P_{so}	$7.58 imes 10^{-9} (12.7\%)^{*}$
	②基地-訓練空域間を往復時の落下 事故	P_{se}	$2.06 \times 10^{-8} (34.4\%)^{**}$
合計(P _{d,a} +P _c +P _v +P _{so} +P _{se})			$5.98 \times 10^{-8} (100\%)^{*}$

表1 評価結果

※()内の数値は、合計に対する割合を示す。

1. 計器飛行方式 民間航空機の落	 ①飛行場での離着陸時における落下 事故 	P _{d,a}	3.79×10^{-10}
下事故	②航空路を巡航中の落下事故	Pc	3.72×10^{-10}
2. 有視界飛行方式民間航空機の落下事故 Pv		3.44×10^{-8}	
 3. 自衛隊又は米 軍機の落下事故 	①訓練空域内を訓練中及び訓練空域 周辺を飛行中の落下事故	P_{so}	$7.58 imes 10^{-9}$
	②基地-訓練空域間を往復時の落下 事故	P_{se}	4.12×10^{-8}
合計(P _{d,a} +P _c +P _v +P _{so} +P _{se})			8.40×10^{-8}

表2 事故件数の増加を仮定した評価の結果



図1 原子炉施設の全体配置図



【標的面積】 投影面積:0.00478 [km²] 水平断面積:0.00374 [km²]

図2 標的面積



図3 空港から最大離着陸地点までの距離(5)



_

表 1. SI 基本単位			
II 基本単位			
本平里	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	Α	
熱力学温度	ケルビン	Κ	
物質量	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	
AI 立長 SI 組立単位		
名称	記号	
面 積 平方メートル	m ²	
体 積 立方メートル	m ³	
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s	
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2	
波 数 毎メートル	m ⁻¹	
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³	
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²	
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg	
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²	
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m	
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸	
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³	
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1	
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	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

	SI 旭立単位				
組立量	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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$	
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 ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v

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	۰	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 ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t=10^3 kg$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

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 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} 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 ¹¹ 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 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(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		記号	SI 単位で表される数値			
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$