

水素ガス気泡発生挙動解析プログラムの作成

仕様書

令和 8 年 7 月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

廃炉環境国際共同研究センター

廃炉システムグループ

1. 一般仕様

1. 1 件名

水素ガス気泡発生挙動解析プログラムの作成

1. 2 目的及び概要

本件は、令和7年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発）」に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業「粉状及びスラリー・スラッジ状燃料デブリの取り扱い時における水素挙動の研究開発（ α 線の影響検証他）」において、廃炉環境国際共同研究センター・廃炉システムグループが実施する水素ガスだまりの挙動解析・評価の一環として、水の放射線分解による水素ガス気泡の発生・成長プロセスをシミュレートする解析プログラムの作成を請け負わせるための仕様を定めるものである。

1. 3 仕様範囲

本仕様では、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置で発生した粉状及びスラリー・スラッジ状の燃料デブリを安全・かつ確実かつ合理的に収納・移送・保管できるシステムの開発に向けて、発生する水素の挙動を熟慮した対策や当該燃料デブリなどの保管様式の検討が行われている。粉状燃料デブリを含む懸濁水中で、放射線分解によって生じる水素ガス気泡がランダムに発生し成長する際の挙動を計算するために必要な解析プログラムを作成し、プログラム仕様、使用方法、機能検証結果を報告書に取りまとめる。

1. 4 作業内容

粉状燃料デブリ保管時を模擬した懸濁水中での水素気泡の発生プロセスを計算するためのプログラムを構築する。懸濁水中でガスだまりが形成されるシミュレーションプログラムと連成した機能を有する。シミュレーションを行って、機能を検証するとともに、懸濁水中での気泡発生速度、発生分布及び、成長速度等について分析し、結果を報告書に纏める。

1. 5 納入品

- | | |
|---|-----|
| (1) 報告書 | 3 部 |
| (2) 報告書、プログラム、入力データ、評価結果等を保存したセキュリティ機能付き USB フラッシュメモリ | 1 式 |
| (報告書のファイル形式は、MS-Word、及び MS-Excel とする。) | |

1. 6 提出図書

- | | | |
|---------------------------|----------|-----|
| (1) 工程表 | 契約後速やかに | 3 部 |
| (2) 打ち合わせ議事録 | 打ち合わせの都度 | 3 部 |
| (3) 委任先又は中小受託事業者等の承認について* | | |

※:原子力機構指定様式 作業開始 2 週間前まで 1 部

(提出場所)

原子力科学研究所 廃炉環境国際共同研究センター 廃炉システムグループ

1. 7 納期

令和 9 年 1 月 15 日

1. 8 納入場所

原子力科学研究所 廃炉環境国際共同研究センター 廃炉システムグループ
第 3 研究棟 303 号室

1. 9 検収条件

1.5 納入品および 1.6 提出図書の完納及び内容検査の合格を並びに原子力機構が仕様書に定める業務が実施された時をもって検収とする。

1. 10 検査員及び監督員

検査員：一般検査 管財担当課長

監督員：廃炉環境国際共同研究センター 廃炉システムグループ員

1. 11 知的財産権等

知的財産権等の取扱いについては、別紙 1 「知的財産権特約条項」に定められたとおりとする。

1. 12 グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA 機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様で定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

1. 13 その他

- ・受注者は、原子力機構担当者と緊密な連絡を取りつつ作業を行うこと。原子力機構

担当者が必要と認めた場合には、随時技術打ち合わせを行うこと。

- ・受注者は、業務上知り得た情報を原子力機構の許可無く第三者に口外してはならない。
- ・受注者は、原子力機構から提出される技術資料、情報等を第三者に提供する場合、予め書面による許可を求め、原子力機構の承認を得なければならない。
- ・本作業による成果に関する一切の権利は、原子力機構に帰属するものとする。
- ・貸与品（使用許可品）に関し、本契約以外での使用は、受注者が予め書面による許可を求め、原子力機構の承認を得なければならない。
- ・本仕様書に関して疑義が生じた場合は、双方協議の上、原子力機構が指示する。

2. 技術仕様

2. 1 作業対象

本作業の対象は、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置で発生する粉状燃料デブリを保管する収納缶内の懸濁水中での水素ガスだまりの保持特性を把握するためを行う。

2. 2 作業内容

本作業では、放射線分解によって空間中にランダムに発生した溶存水素が粒径の異なる固体微粒子を含む懸濁水で満たした容器内で、a.拡散、相互作用によって移動するとともに、合一等により局所的に溶存水素濃度が上昇することで、飽和溶解度を上回った場合に気泡化するプロセスをシミュレートし、b.気泡が成長して、懸濁水中で運動（または保持）する流動プログラムと連成するプログラムを作成し、機能検証結果を報告書に取り纏めるものとする。

2. 2. 1 数値解析モデルによる定式化

図1に示すようなプロセスで懸濁水中に水素ガスだまりを形成するリスクがある。懸濁水は、 $0.1\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ で粒径分布をもった固体微粉子を含む水で、初期状態では、一様な濃度分布に混合されているが、時間と共に重力沈降して密度分布をもったスラリー（スラッジ）堆積層を形成する。一方、時間と共に懸濁水中には、放射線分解によって溶存水素が発生する。長期にわたって持続的に発生する溶存水素は懸濁水中を拡散する中で粒子間隙等の移動領域の制約や再結合反応、相互作用等による影響を受けて局所的に合一等によって濃度が高まり、飽和溶解度とのバランスで気泡（気相ガス）化する。一部の発生水素は、スラリー状の堆積層の降伏応力（あるいは粘性力）や、気泡に付いた固体粒子に働く重力によって、強く捕獲されガスだまりを形成する。スラリーの上澄みと空気層の界面では水蒸気の蒸発とともに水素ガスが流出する。捕獲状態からの気体の放出には、スラリー（スラッジ）の降伏応力が重要なパラメータとなる。

そこで、懸濁水中のサブミクロンからミリスケールの固体粒子の堆積層中の気泡の発生・移動挙動による内部構造変化や再結合反応、相互作用等の影響をうけた溶存水素が移動・合一過程をへて、空間中に気泡化し、サブミクロンからミリスケールの気泡に成長するプロセスをシミュレーションするための解析的な処理に向けた定式化を行う。定式化にあたっては、固体粒子の沈降状態を液相粘度と固体粒子群で粘度モデル化するとともに、固相（微細懸濁物、スラッジ等）、液相（非ニュートン流体）、気相（気泡等）との相互作用を考慮したオイラー・ラグランジュ混相モデルや粒子法を含む最適な CFD 計算手法を選定して CFD-DEM ソフトウェア（OpenFOAM 等）との連成（連携）を想定した体系とすること。特に、液相粘度と固体粒子群による粘度モデルは、非ニュートン流体特性を再現する降伏応力等の粘度特性に固相充填率や粒径、気泡分散率等の影響

を考慮し、固体粒子群との相互作用を含め連成して構造粘性を形成するモデルを検討して、固体の沈降分布や気泡の上昇挙動の精度向上を図ること。また、各現象は、水素以外の雰囲気ガスや分解生成物他の化学種の拡散と崩壊熱の影響等による非等温条件を考慮して検討のこと。また、容器に外部荷重を加えた際のガスだまりへの影響を検証できるように外力を定式化に反映のこと。各計算モデルは、OpenFOAM、各種 CFD、DEM プログラム等の解析事例等を調査の上、解析対象の実時間や空間スケールを考慮して、現象の再現性に必要な最小限の実装モデルとすること。

(参考文献)

- (i)Tatsuya Ito,et.al, "Retention of Hydrogen Bubbles Generated from Water Radiolysis in Carbonate Slurry", Nucl.Tech., <https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2299893>
- (ii)最近の化学工学 72 化学工学系流体シミュレーションの最前線、化学工学会、vol.72、(2024)
- (iii)IRID、令和 4 年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発（粉状、スラリー・スラッジ状燃料デブリの保管までに必要な技術の開発））2022 年度最終報告、<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2023/06/2022014syuunoukankonajyoyuF202306.pdf>

2. 2. 2 プログラムの構築及び機能検証

2. 2. 1 項について定式化したモデルについて、数値計算プログラムを構築する。長期にわたる現象解析を対象としているため、可能な限り、プログラムは高速化を考慮した構成、解法を採用すること。入出力ファイルは、テキスト形式で Excel 等を用いて容易にグラフ化可能なこと。また、分布性状については、可視化ソフトウェアを用いて可視化編集可能なこと。

構築したプログラムを用いて、図 2 に示すような定常、および過渡的に局所的な照射領域（非等温場）に応じた溶存水素発生条件、粒子分散状況等の初期条件、境界条件のもと機能検証を行い、モデルが正常に動作することを確認のこと。また、実験定数や物性値等の気泡の発生特性（発生速度、発生分布、気泡径の成長速度等）に影響する因子についての感度解析を行い、別途提示する実験結果との比較検証結果を整理すること。

2. 3 報告書の作成

解析コードの仕様、機能検証結果、及び実施したモデル調査結果等を報告書にまとめること。

2. 4 原子力機構からの提示情報、貸与品

作成、検証に必要な情報は、原子力機構から受注者に提示する。貸与品はなし。

2. 5 作業に係る留意点

- ・受注者は作業の詳細について発注者の指示に従うこと。
- ・受注者は作業の進捗について随時発注者に報告すること。
- ・本作業の遂行上引用した文献等については、その出典を明らかにすること。
- ・本作業で疑義が生じた場合、受注者は発注者と協議して対処すること。

以上

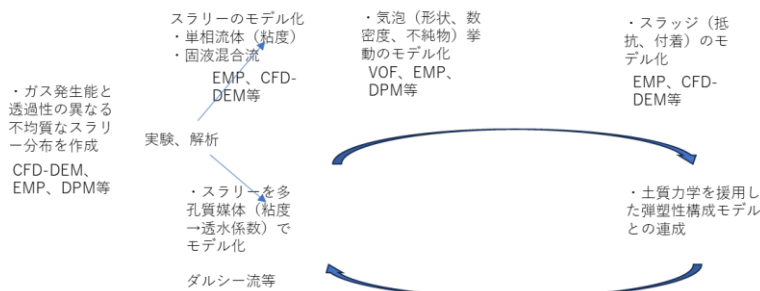
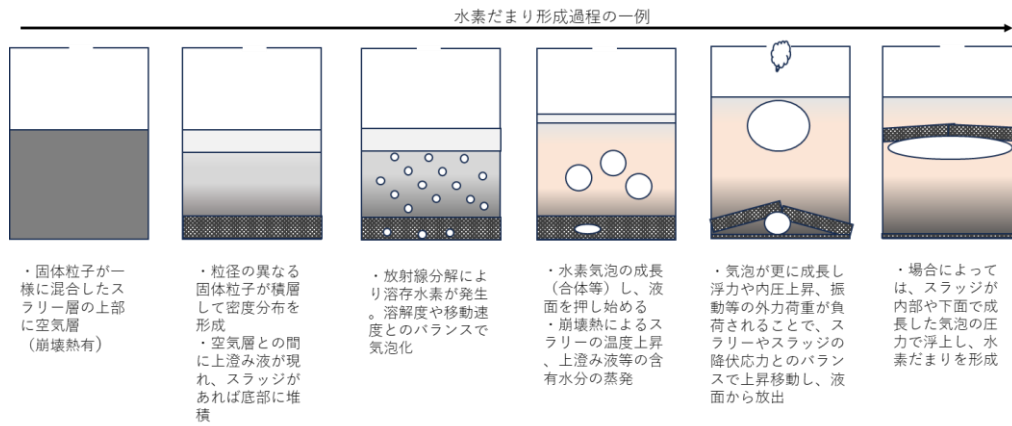
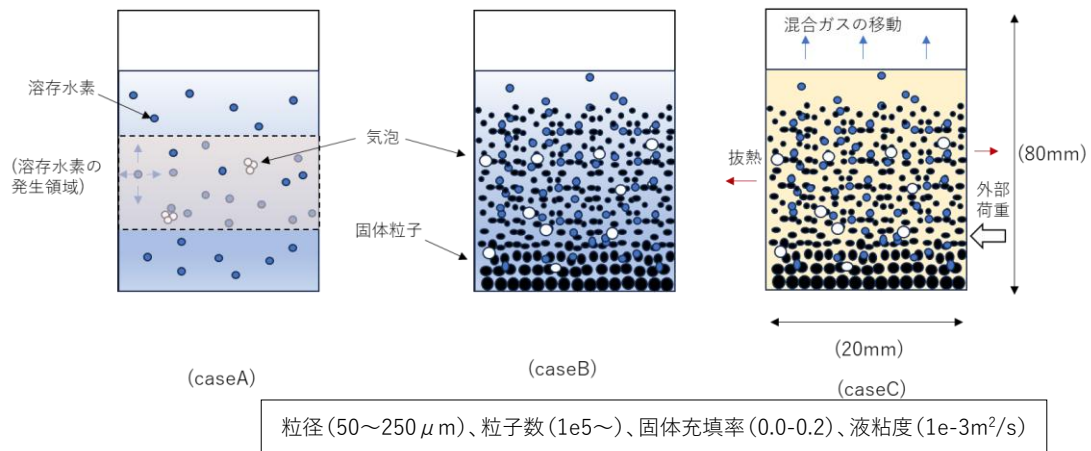


図1 モデルの構築（参考）



機能検証

(caseA)照射条件（時間、空間分布）に応じて、発生した溶存水素が合一し成長、気泡径分布を形成（2 ケース）。特に微細気泡からの気泡成長プロセスと相互作用の影響

(caseB)沈降状況を反映した固体粒子、気泡径分布を有する高粘度流体中での上記気泡の形成（2 ケース）。特に粘度特性（障害物と構造粘性）のモデル高度化

(caseC)水素以外の分解生成物等の拡散、及び崩壊熱による非等温場の影響（2 ケース）特に気泡の成分特性と熱、外力等の外的要因の影響

図2 解析モデルケースの概要（参考）

知的財産権特約条項

(知的財産権の範囲)

第1条 この特約条項において「知的財産権」とは、次の各号に掲げるものをいう。

- (1) 特許法（昭和34年法律第121号）に規定する特許権（以下「特許権」という。）、実用新案法（昭和34年法律第123号）に規定する実用新案権（以下「実用新案権」という。）、意匠法（昭和34年法律第125号）に規定する意匠権（以下「意匠権」という。）、半導体集積回路の回路配置に関する法律（昭和60年法律第43号）に規定する回路配置利用権（以下「回路配置利用権」という。）、種苗法（平成10年法律第83号）に規定する育成者権（以下「育成者権」という。）及び外国における上記各権利に相当する権利（以下「産業財産権等」と総称する。）
- (2) 特許法に規定する特許を受ける権利、実用新案法に規定する実用新案登録を受ける権利、意匠法に規定する意匠登録を受ける権利、半導体集積回路の回路配置に関する法律第3条第1項に規定する回路配置利用権の設定の登録を受ける権利、種苗法第3条に規定する品種登録を受ける地位及び外国における上記各権利に相当する権利（以下「産業財産権等を受ける権利」と総称する。）
- (3) 著作権法（昭和45年法律第48号）に規定するプログラムの著作物及びデータベースの著作物（以下「プログラム等」という。）の著作権並びに外国における上記各権利に相当する権利（以下「プログラム等の著作権」と総称する。）
- (4) コンテンツの創造、保護及び活用の促進に関する法律（平成16年法律第81号）に規定するコンテンツで甲が本契約において制作を委託するコンテンツ（以下「コンテンツ」という。）の著作権（以下「コンテンツの著作権」という。）
- (5) 前各号に掲げる権利の対象とならない技術情報のうち秘匿することが可能なものであって、かつ、財産的価値のあるものの中から、甲、乙協議の上、特に指定するもの（以下「ノウハウ」という。）を使用する権利

2 この特約条項において、「発明等」とは、特許権の対象となるものについては発明、実用新案権の対象となるものについては考案、意匠権、回路配置利用権及びプログラム等の著作権の対象となるものについては創作、育成者権の対象となるものについては育成並びにノウハウを使用する権利の対象となるものについては案出をいう。

3 この特約条項において知的財産権の「実施」とは、特許法第2条第3項に定める行為、実用新案法第2条第3項に定める行為、意匠法第2条第3項に定める行為、半導体集積回路の回路配置に関する法律第2条第3項に定める行為、種苗法第2条第5項に定める行為、プログラム等の著作権については著作権法第2条第1項第15号及び同項第19号に定める行為、コンテンツの著作権については著作権

法第2条第1項第7の2号、第9の5号、第11号にいう翻案、第15号、第16号、第17号、第18号及び第19号に定める行為並びにノウハウの使用をいう。

(乙が単独で行った発明等の知的財産権の帰属)

第2条 本契約に関して、乙単独で発明等を行ったときは、甲は、乙が次の各号のいずれの規定も遵守することを書面で甲に届け出た場合、当該発明等に係る知的財産権を乙から譲り受けないものとする。(以下、乙に単独に帰属する知的財産権を「単独知的財産権」という。)

- (1) 乙は、本契約に係る発明等を行ったときは、遅滞なく次条の規定により、甲にその旨を報告する。
 - (2) 乙は、甲が国の要請に基づき公共の利益のために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求める場合には、無償で当該知的財産権を実施する権利を国に許諾する。
 - (3) 乙は、当該知的財産権を相当期間活用していないと認められ、かつ、当該知的財産権を相当期間活用していないことについて正当な理由が認められない場合において、甲が国の要請に基づき当該知的財産権の活用を促進するために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求めるときは、当該知的財産権を実施する権利を第三者に許諾する。
 - (4) 乙は、甲以外の第三者に委託業務の成果にかかる知的財産権の移転又は専用実施権(仮専用実施権を含む。)若しくは専用利用権の設定その他日本国内において排他的に実施する権利の設定若しくは移転の承諾(以下「専用実施権等の設定等」という。)をするときは、合併又は分割により移転する場合及び次のイからハまでに規定する場合を除き、あらかじめ甲に通知し、承認を受けなければならない。
 - イ 乙が株式会社である場合、乙がその子会社(会社法(平成17年法律第86号)第2条第3号に規定する子会社をいう。)又は親会社(同法第4号に規定する親会社をいう。)に移転又は専用実施権等の設定等をする場合
 - ロ 乙が承認TLO(大学等における技術に関する研究成果の民間事業者への移転の促進に関する法律(平成10年法律第52号)第4条第1項の承認を受けた者(同法第5条第1項の変更の承認を受けた者を含む。))又は認定TLO(同法第12条第1項又は同法第13条第1項の認定を受けた者)に移転又は専用実施権等の設定等をする場合
 - ハ 乙が技術研究組合である場合、乙がその組合員に移転又は専用実施権等の設定等をする場合
- 2 甲は、乙が前項に規定する書面を提出しない場合、乙から当該知的財産権を無償で(第7条に規定する費用を除く。)譲り受けるものとする。

- 3 乙は、第1項の書面を提出したにもかかわらず同項各号の規定のいずれかを満たしておらず、かつ満たしていないことについて正当な理由がないと甲が認める場合、当該知的財産権を無償で甲に譲り渡さなければならない。

(知的財産権の報告)

第3条 乙は、本契約に係る産業財産権等の出願又は申請をするときは、あらかじめ出願又は申請に際して提出すべき書類の写しを添えて甲に通知しなければならない。

- 2 乙は、前項に係る国内の特許出願、実用新案登録出願、意匠登録出願を行う場合は、特許法施行規則第23条第6項及び同規則様式26備考24等を参考にし、当該出願書類に国の委託事業に係る研究の成果による出願であることを表示しなければならない。

- 3 乙は、第1項に係る産業財産権等の出願又は申請に関して設定の登録等を受けた場合には、設定の登録等の日から30日以内に、甲に文書により通知しなければならない。

- 4 乙は、本契約に係るプログラム等又はコンテンツが得られた場合には、著作物が完成した日から30日以内に、甲に文書により通知しなければならない。

- 5 乙は、単独知的財産権を自ら実施したとき、及び第三者にその実施を許諾したとき（ただし、第5条第2項に規定する場合を除く。）は、甲に文書により通知しなければならない。

(単独知的財産権の移転)

第4条 乙は、単独知的財産権を甲以外の第三者に移転する場合には、当該移転を行う前に、その旨を甲に文書で提出し、承認を受けなければならない。ただし、合併又は分割により移転する場合及び第2条第1項第4号イからハまでに定める場合には、当該移転の事実を文書より甲に通知するものとする。

- 2 乙は、前項のいずれの場合にも、第2条、前条、次条及び第6条の規定を準用すること、並びに甲以外の者に当該知的財産権を移転するとき又は専用実施権等を設定等するときは、あらかじめ甲の承認を受けることを当該第三者と約定させ、かつ、第2条第1項に規定する書面を甲に提出させなければならない。

(単独知的財産権の実施許諾)

第5条 乙は、単独知的財産権について甲以外の第三者に実施を許諾する場合には、甲に文書により通知しなければならない。また、第2条の規定の適用に支障を与えないよう当該第三者と約定しなければならない。

- 2 乙は、単独知的財産権に関し、甲以外の第三者に専用実施権等の設定等を行う場合には、当該設定等を行う前に、文書により甲及び国の承認を受けなければならない。

ない。ただし、第2条第1項第4号イからハまでに定める場合には、当該専用実施権等設定の事実を文書により甲に通知するものとする。

- 3 甲は、単独知的財産権を無償で自ら試験又は研究のために実施することができる。甲が甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に再実施権を許諾する場合は、乙の承諾を得た上で許諾するものとし、その実施条件等は甲、乙協議の上決定する。

(単独知的財産権の放棄)

第6条 乙は、単独知的財産権を放棄する場合は、当該放棄を行う前に、その旨を甲に報告しなければならない。

(単独知的財産権の管理)

第7条 甲は、第2条第2項の規定により乙から単独知的財産権又は当該知的財産権を受ける権利を譲り受けたときは、乙に対し、乙が当該権利を譲り渡すときまでに負担した当該知的財産権の出願又は申請、審査請求及び権利の成立に係る登録までに必要な手続に要したすべての費用を支払うものとする。

(甲及び乙が共同で行った発明等の知的財産権の帰属)

第8条 本契約に関して、甲及び乙が共同で発明等を行ったときは、当該発明等に係る知的財産権は甲及び乙の共有とする。ただし、乙は、次の各号のいずれの規定も遵守することを書面で甲に届け出なければならない。(以下、甲と乙が共有する知的財産権を「共有知的財産権」という。)

- (1) 当該知的財産権の出願等権利の成立に係る登録までに必要な手続は乙が行い、第3条の規定により、甲にその旨を報告する。
- (2) 乙は、甲が国の要請に基づき公共の利益のために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求める場合には、無償で当該知的財産権を実施する権利を国に許諾する。
- (3) 乙は、当該知的財産権を相当期間活用していないと認められ、かつ、当該知的財産権を相当期間活用していないことについて正当な理由が認められない場合において、甲が国の要請に基づき当該知的財産権の活用を促進するために特に必要があるとして、その理由を明らかにして求めるときは、当該知的財産権を実施する権利を第三者に許諾する。

2 甲は、乙が前項で規定する書面を提出しない場合、乙から当該知的財産権のうち乙が所有する部分が無償で譲り受けるものとする。

3 乙は、第1項の書面を提出したにもかかわらず同項各号の規定のいずれかを満たしておらず、さらに満たしていないことについて正当な理由がないと甲が認める場

合、当該知的財産権のうち乙が所有する部分が無償で甲に譲り渡さなければならない。

(共有知的財産権の移転)

第9条 甲及び乙は、共有知的財産権のうち自らが所有する部分を相手方以外の第三者に移転する場合には、当該移転を行う前に、その旨を相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の実施許諾)

第10条 甲及び乙は、共有知的財産権について第三者に実施を許諾する場合には、あらかじめ相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の実施)

第11条 甲は、共有知的財産権を試験又は研究以外の目的に実施しないものとする。

ただし、甲は甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に実施許諾する場合は、無償で当該第三者に実施許諾することができるものとする。

2 乙が共有知的財産権について自ら商業的实施をするときは、甲が自ら商業的实施をしないことにかんがみ、乙の商業的实施の計画を勘案し、事前に実施料等について甲、乙協議の上、別途実施契約を締結するものとする。

(共有知的財産権の放棄)

第12条 甲及び乙は、共有知的財産権を放棄する場合は、当該放棄を行う前に、その旨を相手方に通知して文書による同意を得なければならない。

(共有知的財産権の管理)

第13条 共有知的財産権に係る出願等を甲、乙共同で行う場合、共同出願契約を締結するとともに、出願等権利の成立に係る登録までに必要な費用は、当該知的財産権に係る甲及び乙の持分に応じて負担するものとする。

(知的財産権の帰属の例外)

第14条 本契約の目的として作成される提出書類、プログラム等及びその他コンテンツ等の納品物に係る著作権は、すべて甲に帰属する。

2 第2条第2項及び第3項並びに第8条第2項及び第3項の規定により著作権を乙から甲に譲渡する場合、又は前項の納品物に係る著作権の場合において、当該著作物を乙が自ら創作したときは、乙は、著作者人格権を行使しないものとし、当該著作物を乙以外の第三者が創作したときは、乙は、当該第三者が著作者人格権

を行使しないように必要な措置を講じるものとする。

(秘密の保持)

第15条 甲及び乙は、第2条及び第8条の発明等の内容を出願公開等により内容が公開される日まで他に漏えいしてはならない。ただし、あらかじめ書面により出願申請を行った者の了解を得た場合はこの限りではない。

(委任・下請負)

第16条 乙は、本契約の全部又は一部を第三者に委任し、又は請け負わせた場合においては、当該第三者に対して本特約条項の各条項の規定を準用するものとし、乙はこのために必要な措置を講じなければならない。

2 乙は、前項の当該第三者が本特約条項に定める事項に違反した場合には、甲に対し全ての責任を負うものとする。

(協議)

第17条 第2条及び第8条の場合において、単独若しくは共同の区別又は共同の範囲等について疑義が生じたときは、甲、乙協議して定めるものとする。

(有効期間)

第18条 本特約条項の有効期限は、本契約締結の日から当該知的財産権の消滅する日までとする。