

RI 水分計によるフレッシュコンクリートの 単位水量変動の連続測定

井上 恵介・瀬古 繁喜・荒井 正直

フレッシュコンクリートの単位水量を測定する方法として、すでにいくつかの試験法が提案され、実用化されている。しかし、これらのほとんどは、採取した試料を供試体として実施するものであり、測定結果の施工への迅速なフィードバック、視覚化、共有化という点において必ずしも十分とはいえない。本稿では、これらと差別化する試験法として、圧送配管内のフレッシュコンクリート全量の単位水量変動をほぼリアルタイムで測定し、オンラインによる遠隔モニタリングも可能とする連続式 RI コンクリート水分計の概要を紹介するとともに、その有効性について述べる。

キーワード：コンクリート、単位水量、変動、リアルタイム、連続、フィードバック、RI

1. はじめに

フレッシュコンクリートの単位水量の大小がコンクリート構造物の品質に大きな影響を及ぼすということは一般に指摘されていることであり、単位水量を検査・管理すべく、これまでに数多くの単位水量の試験方法が提案されている。

特に国土交通省の直轄工事においては、平成 15 年の課長通知によってコンクリート打設時の単位水量の測定検査が義務付けられたことにより、コンクリート工事におけるフレッシュコンクリートの単位水量測定は定常化している。

現在、広く利用されている単位水量測定方法は、空気量測定装置を利用するエアメータ法、電子レンジを利用する高周波加熱乾燥法である。これらの方法は一部の試料コンクリートに対して試験を行うもの（サンプリング方式）であり、本来ばらつきが存在する材料であるコンクリートの単位水量を測定する方法として十分なものとはいえない。また、測定者による個人差が現れやすいことがあり、試料の代表性という観点からも必ずしも適切であるとは言い切れない部分があると考えられる。

筆者らは、ラジオアイソトープ (Radio Isotope, 以下 RI と称する) を利用した水分計が非接触で物質中の水分量の変動を測定できることに着目し、コンクリート圧送配管に RI 水分計を取り付けることによって、圧送配管を流れるフレッシュコンクリートの単位水量変動を連続的にかつ、リアルタイムで測定できる

技術を開発した。また、開発当初から測定データの活用方法を検討し、現状では携帯電話を利用したデータ通信による遠隔モニタリングが可能となっている。

本稿では、現在広く利用されているサンプリング方式の測定方法とは一線を画す技術として、連続式 RI コンクリート水分計を紹介する。

2. RI 水分計の測定原理

(1) RI 水分計の歴史

RI から放出される放射線を利用する水分量測定法は、放射線の一種である中性子線と測定対象物との相互作用を利用する。中性子線を利用する水分計は、1940 年代に米国で開発され、以降、おもに土の水分量を測定する機器として研究開発がなされてきた¹⁾。

わが国においても、1950 年代より当時の建設省土木技術研究所 (現、独土木研究所) にて実用化試験が開始され、その後、公的機関、計測機器メーカーによって改良が進められた。現在、建設業界においては、盛土の締固め管理用としてガンマ線密度計と一体化した密度・水分計として普及している¹⁾。

(2) 測定原理

RI 水分計の中性子線源には、²⁵²Cf (カリホルニウム 252) が多く用いられている。

²⁵²Cf からは、速中性子線と呼ばれる高エネルギーの中性子線が放出されているが、速中性子線は物質中の原子との弾性散乱によって次第にその運動エネルギー

を失い、やがて熱中性子へと変わっていく。速中性子線のエネルギーを減衰させ、熱中性子線とする能力を減速能というが、水素原子の減速能は他の原子に比べ飛び抜けて大きい。

したがって、水素原子によって減速されずに残った速中性子線、あるいは水素原子によって減速された熱中性子線のいずれかを計数することで測定対象中の水素量を測定することができる。コンクリート中に含まれる水素原子は、その大部分が水の形で存在しているため、水素量を測定することで水分量を決定することができる。

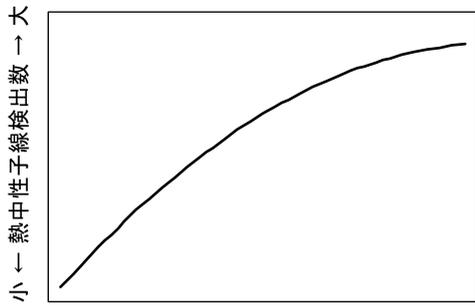
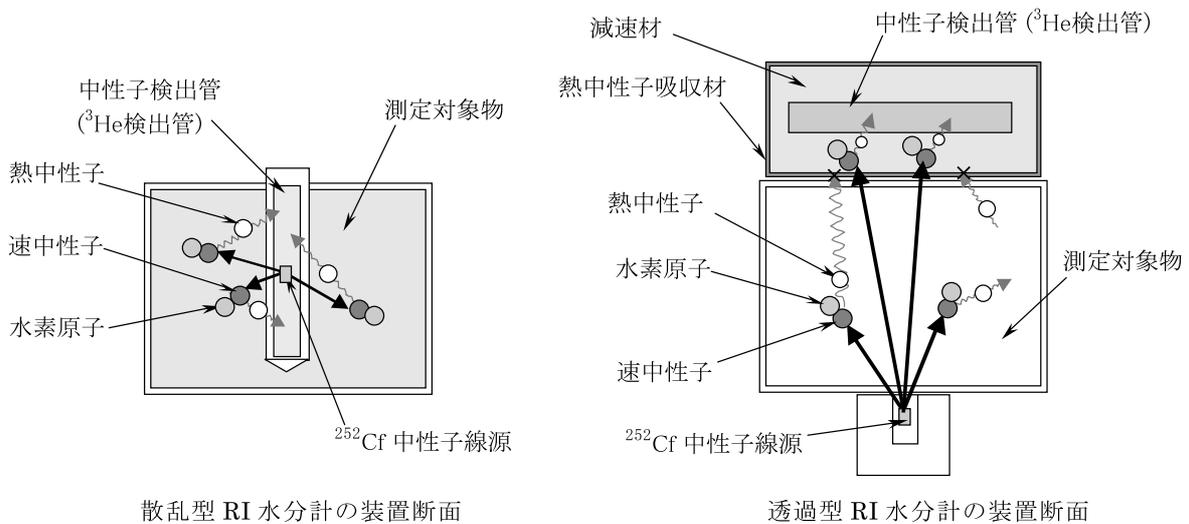
図一1に、RI水分計の測定原理のイメージを示す。RI水分計は、a) 散乱型とb) 透過型の2種類に分類される。散乱型RI水分計は、中性子線源から放出された速中性子線のうち、試料中の水素によって減速されて中性子線検出部に入射した熱中性子線の数を集計して試料中の水分量を求める方法である²⁾。

一方、透過型RI水分計は水素で減速されずにコンクリートを透過し、検出部に入射した速中性子線を計数して試料中の水分量を求める。

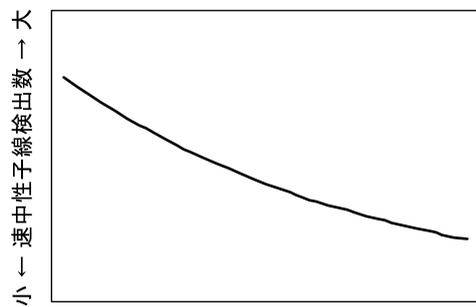
散乱型、透過型ともに、中性子線の検出には³He(ヘリウム3)比例計数管が使用されている。ただし、透過型の場合、³He比例計数管で検出できる中性子線が熱中性子線のエネルギーレベルであるため以下に示す方法で速中性子線を検出している。

検出部に入射した速中性子線は、まず³He比例計数管の周囲に配置された減速材によって強制的に熱中性子線に変換される。変換された熱中性子線を³He比例計数管で検出する。減速材は水素原子を多く含むポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)が用いられる。また、検出部内の減速材以外によって生成された熱中性子線は測定の誤差要因となるため、排除する必要がある。減速材の外部で生成された熱中性子線を吸収して³He検出管に入射させないように、減速材の周囲を熱中性子吸収材で覆っている。

以上がRI水分計の基本的な測定原理であるが、この原理を利用した方法はあくまで間接的に水分量を測定するため、コンクリート中を透過して検出器に達する中性子の数と水分量との関係をあらかじめ検定しておく必要がある。



散乱型 RI 水分計の応答特性



透過型 RI 水分計の応答特性

図一1 RI水分計の測定原理

3. 連続式 RI コンクリート水分計の概要と特徴

(1) 開発の背景

RI 水分計をフレッシュコンクリートの単位水量の測定に利用する研究は、1990 年代初頭よりスタートし、以来、測定機器や測定方法の検討・改良を進めてきた。

当初、エアメータ容器に詰めた試料コンクリートを測定対象とする「サンプリング方式」として開発を行ったが、サンプリング方式では、おもに試料中の粗骨材量のばらつきに起因する測定誤差を排除するのが実用上難しいことがわかった。そこで、圧送配管を流れるフレッシュコンクリート全量を連続的に測定できる「連続式」の開発に移行するに至った^{3)・4)}。

この研究・開発は、フレッシュコンクリート全量の単位水量を連続的にモニタリングすることによって、合理的・効果的な「単位水量の見張り番」を実現することを目的として、ソイルアンドロックエンジニアリング(株)、(株)竹中工務店および(財)日本建築総合試験所の三者が共同で行ったものである。

(2) 連続式 RI コンクリート水分計の構成

連続式 RI コンクリート水分計の構成を図-2 に示す。①の透過型 RI 水分計と②のガンマ線密度計は、速中性子線あるいはガンマ線（放射線の一種）を放出

する線源部と、測定対象であるフレッシュコンクリート透過した速中性子線およびガンマ線を検出する検出部で形成される。透過型 RI 水分計、ガンマ線密度計それぞれの検出部は、コンクリート圧送配管に強固に固定できるフレームを用いて、線源部と検出部の幾何学関係が一定な状態を保持する構造となっている。

ガンマ線密度計は、RI から放出されるガンマ線と物質との相互作用を利用して測定対象の密度を測定する。ガンマ線源として、⁶⁰Co（コバルト 60）を使用している。ガンマ線密度計は、コンクリート圧送配管中のコンクリート密度、すなわち単位容積質量を測定するもので、水分計の補助的な役割を担っている。圧送圧力の変動や、配管の磨耗による配管肉厚の減少が単位水量の測定結果へ影響を及ぼすため、これらの影響要因を補正することを目的としている。

③のデータ処理部は、検出部からの電気信号を 1 秒ごとの放射線を計数・計算処理し、単位水量の算定・表示・記録を行う。

(3) 特徴

連続式 RI コンクリート水分計の特徴をまとめると以下の通りである。

- ①測定器をコンクリート圧送配管に取り付けるため、測定試料に触れることなく配管内を圧送されるフレッシュコンクリートを順次測定して、全量の単位水量の変動をリアルタイムで、連続的に捉えることが

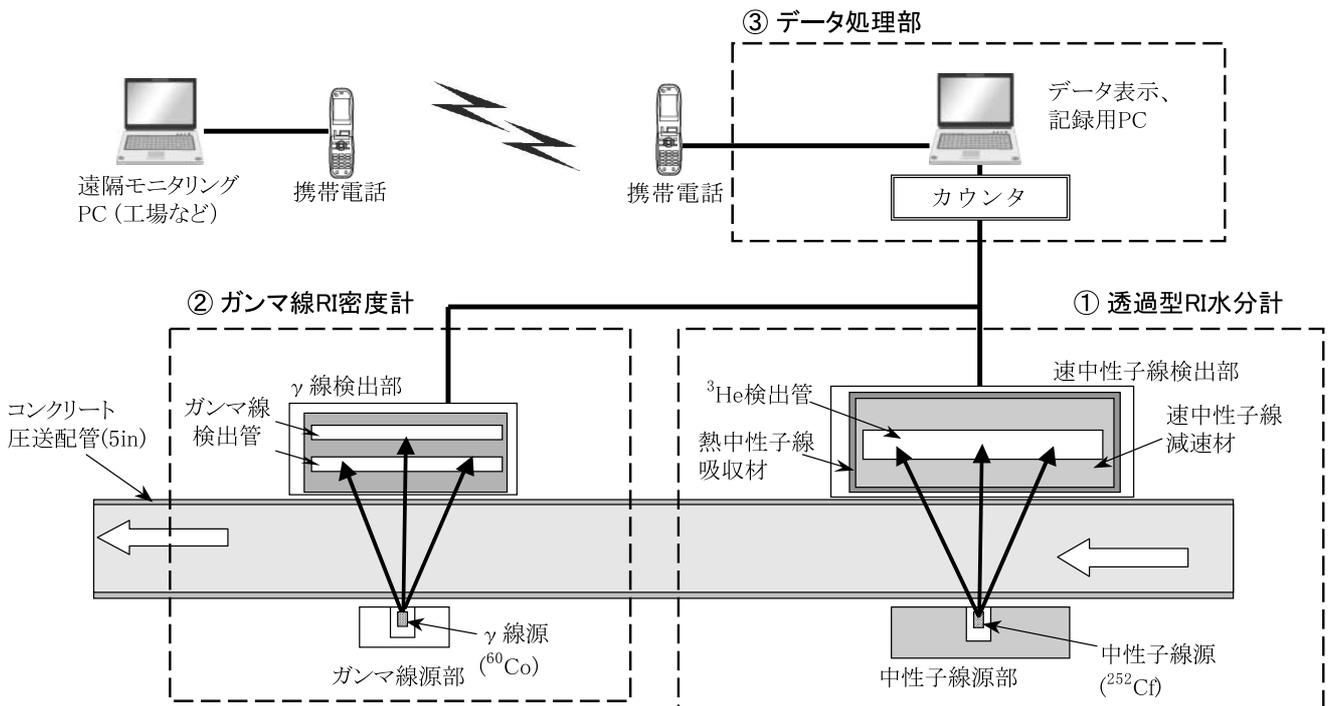


図-2 連続式 RI 水分計の構成

できる。

②データの表示・保存にパーソナルコンピュータを使用しているため、各種通信手段を用いた測定データの転送・遠隔モニタリングを比較的容易に行うことができる。

現在、ある自治体では携帯電話を利用した測定結果の遠隔モニタリングを生コン工場で実施することによって、フレッシュコンクリートの製造にフィードバックする試みを行っている。

4. 測定手順

図—3に、標準的な測定の流れ図を示す。

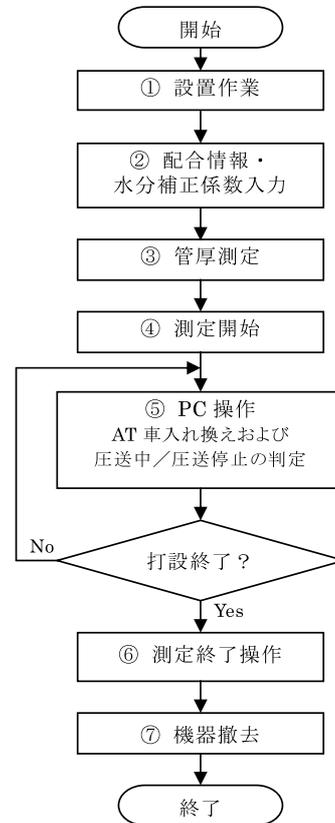
図中、②の水分補正係数とは、単位水量以外の水、おもに骨材内部に吸収された水を補正するための係数であり、測定対象のコンクリートごとに定める必要がある。水分補正係数は一般に単位水量が既知であるコンクリートを測定することによって求める。③の管厚測定は、配管の磨耗による肉厚の減少が測定結果に及ぼす影響を補正するために実施する。管厚測定は、打設開始前の配管内が空の状態の時に、ガンマ線密度計を用いて行う。

測定開始後は、AT車（アジテータトラック）の入れ替わりと圧送／圧送中断のタイミング信号をパソコンのキー操作により入力する（写真—1）。他の試験法にあるような、試料採取・測定・試料廃棄といった作業は不要である。

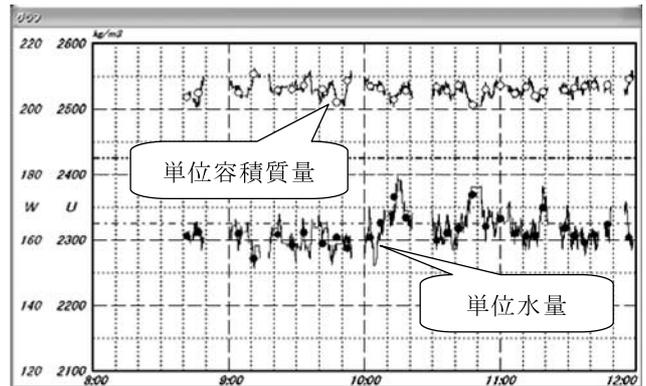
5. 測定結果の紹介

(1) 測定モニタ画面

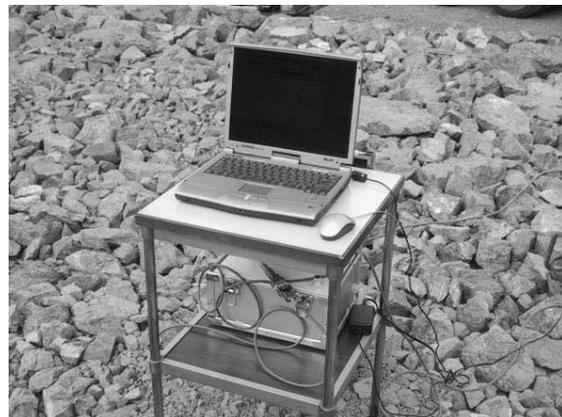
図—4は、連続式RIコンクリート水分計の測定モニタ画面の一例である。時系列で単位水量（図中、下方の折れ線および●）と配管内のコンクリートの単位



図—3 測定の流れ



図—4 測定モニタ画面の一例



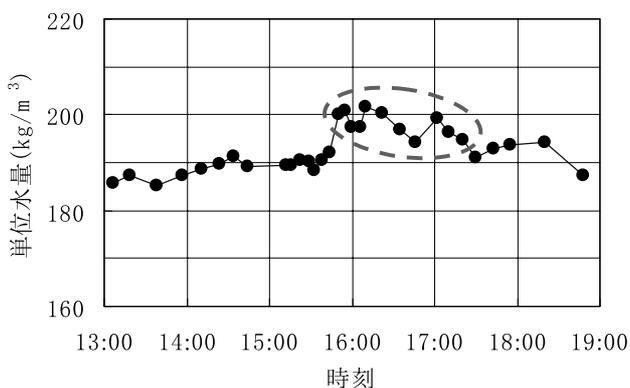
写真—1 コンクリートポンプ車の圧送配管への機器設置状況とデータ処理部

容積質量 U (図中上方の折れ線および○) が併示される。折れ線は 1 秒ごとに出力される連続的な測定値であり、●と○は、それぞれ単位水量，単位容積質量の AT 車 1 台分全量の平均値である。

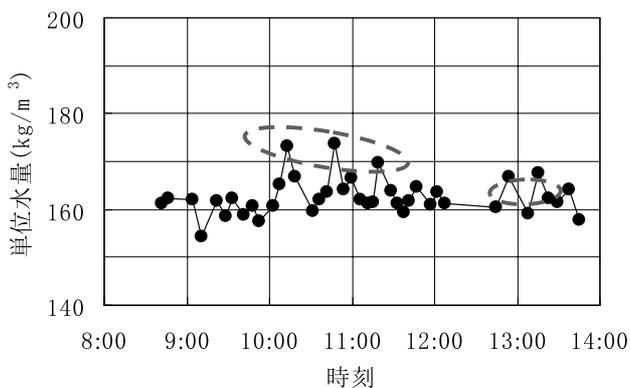
(2) 測定結果例

図一 5, 6, 7 に連続式 RI コンクリート水分計による測定結果についての実例を紹介する。AT 車 1 台分全量の単位水量の平均値を時系列で示した。

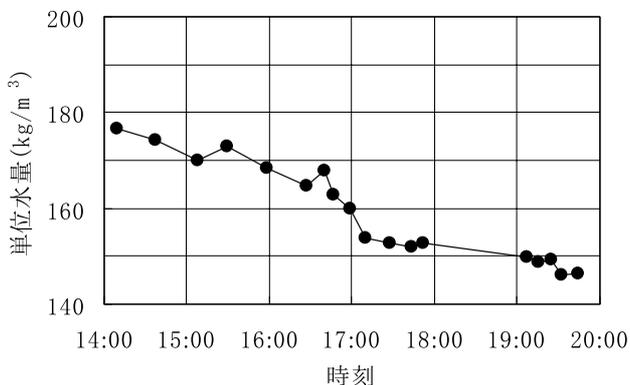
打設中のある時間帯で単位水量が大きく測定された



図一 5 測定結果例 その 1



図一 6 測定結果例 その 2



図一 7 測定結果例 その 3

ケース (図一 5), 一部の AT 車 1 台分の単位水量が大きく測定されたというケース (図一 6), そして時間の経過とともに、単位水量が徐々に小さくなったというケース (図一 7)。これらの事例は、一日の中で骨材の品質 (密度・吸水率や微粒分量, 粒度など) や状態 (表面水量など) といった種々の変動要因によって単位水量も変化することが考えられる。単位水量の変動を把握できる点は連続式 RI コンクリート水分計の特長であり、一部の試料を特定の間隔でサンプリングして行う測定ではこれらの実態を把握することは困難である。逆に、採取した試料コンクリートを測定する既存の試験法で同様なことを実践するためには多大な労力が必要となる。

全数の AT 車に対して、エアメータ法による単位水量測定を実施したといった研究的事例もあるが、これを日常的に実施することは現実的ではない。

6. おわりに

連続式 RI コンクリート水分計は、現在提案されている各種単位水量測定法の中で、唯一、連続測定を実現するものである。

今後もコンクリートの品質向上と安定供給に寄与するために、本技術の有効性を実証すべくデータ収集・改良を継続することが重要であると考えている。

最後に、本技術開発に御尽力頂いた関係各位、また本稿の執筆にあたってご協力戴いた関係者の皆様に誌面を借りて謝意を表する。

JICMA

《参考文献》

- 1) 社地盤工学会, 地盤調査の方法と解説, 丸善, pp592-604, (2004)
- 2) 山田雅裕・森沢友博・菱沼頌夫・前田谷安文: フレッシュコンクリートにおける単位水量測定法に関する研究及び適用事例, コンクリートの試験方法に関するシンポジウム報告集, 日本建築学会, pp.2-51-54, (2003)
- 3) 瀬古繁喜・米澤敏男・田村博・熊原義文・鈴木一雄: 建築現場におけるラジオアイソトープ水分計による生コンクリートの単位水量連続測定, コンクリートの試験方法に関するシンポジウム報告集, 日本建築学会, pp.2-45-50, (2003)
- 4) 瀬古繁喜・米澤敏男・井上孝之・熊原義文: RI 水分計によるフレッシュコンクリート中の単位水量測定に関する研究, コンクリート工学会年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp403-408, (1997)

参考 放射性同位元素装備機器の法規制

連続式 RI コンクリート水分計は、中性子線源およびガンマ線源としてそれぞれ線源強度 1.1 MBq (メガベクレル) の ²⁵²Cf と 2.59 MBq の ⁶⁰Co の合計 3.7 MBq の線源を使用しており、いわゆる放射性同位元素装備機器に該当する。Bq (ベクレル) は放射線源の強度を表す単位である。使用している線源はステンレスカ

プセル密封線源であり、内部の放射性同位元素が外部へ漏洩することはない。

従来、連続式 RI コンクリート水分計のような合計 3.7 MBq 以下の密封線源を使用する放射性同位元素装備機器は、使用について法の規制は一切受けなかった。しかし、平成 17 年 6 月に、「放射性同位元素等による放射線障害防止に関わる法律」が改正され、放射性同位元素装備機器を取り巻く状況が大きく変わった。

改正法は、国際原子力機関（IAEA）が策定した「国際基本安全基準」に基づいて制定され、規制を受ける放射性同位元素の数量が大幅に引き下げられた（表—1）。

規制値が引き下げられたことによって、従来、規制の対象外であった 3.7 MBq 以下の密封放射性同位元素装備機器が規制対象となったが、機器使用に伴うリスクや使用方法に応じ、安全性を損なうことなく合理的な放射性同位元素装備機器の使用を可能にすることを目的として「設計認証制度」が新設された。

表—1 法令改正に伴う規制値の変更

（連続式 RI コンクリート水分計に関わる箇所の抜粋）

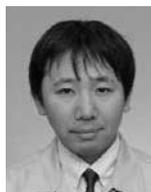
	法改正後	従 来
放射性同位元素の数量	密封、非密封ともに、 ⁶⁰ Co：100 kBq 超	密封されたものについては
規制値	²⁵² Cf：10 kBq 超	一律 3.7 MBq 超

「設計認証制度」とは、法律の改正によって規制の対象となる放射性同位元素装備機器のうち、通常の使用方法であれば特別な管理・資格を要することなく安全性を確保できる機器を認証する制度である。認証を取得した機器は、文部科学省に簡単な届出（表示付認証機器使用届）をするだけで使用することができる。

連続式の RI コンクリート水分計についても、設計認証の取得に努め、平成 19 年 6 月に設計認証を取得（認証番号 ⊕060）するに至っている。

〔筆者紹介〕

井上 恵介（いのうえ けいすけ）
ソイルアンドロックエンジニアリング(株)
技術開発部



瀬古 繁喜（せこ しげき）
(株)竹中工務店
技術研究所 建設技術研究部 材料部門



荒井 正直（あらい まさなお）
(財)日本建築総合試験所
試験研究センター 材料部 材料試験室



建設の機械化／建設の施工企画 2004 年バックナンバー

平成 16 年 1 月号（第 647 号）～平成 16 年 12 月号（第 658 号）

1 月号（第 647 号）
ロボット技術特集

5 月号（第 651 号）
リサイクル特集

9 月号（第 655 号）
維持管理特集

■体裁 A4 判
■定価 各 1 部 840 円
(本体 800 円)

2 月号（第 648 号）
地震防災特集

6 月号（第 652 号）
海外の建設施工特集

10 月号（第 656 号）
環境対策特集

■送料 100 円

3 月号（第 649 号）
地下空間特集

7 月号（第 653 号）
安全対策特集

11 月号（第 657 号）
除雪技術特集

4 月号（第 650 号）
行政特集

8 月号（第 654 号）
情報化施工特集

12 月号（第 658 号）
新技術・新工法特集

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>